



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

— **TELECOM** ESCUELA  
TÉCNICA **VLC** SUPERIOR  
DE INGENIERÍA DE  
TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de  
Telecomunicación

Desarrollo de software para recepción de satélites NOAA  
utilizando SDR

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de  
Telecomunicación

AUTOR/A: Sobrevela Velert, Francesc

Tutor/a: Vidal Pantaleoni, Ana

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

— **TELECOM** ESCUELA  
TÉCNICA **VLC** SUPERIOR  
DE INGENIERÍA DE  
TELECOMUNICACIÓN

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación  
Universitat Politècnica de València  
Edificio 4D. Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia  
Tel. +34 96 387 71 90, ext. 77190  
[www.etsit.upv.es](http://www.etsit.upv.es)

**VLC/**  
**CAMPUS**  
VALENCIA, INTERNATIONAL  
CAMPUS OF EXCELLENCE



## Resumen

El objetivo de este proyecto es estudiar las señales de los satélites meteorológicos NOAA, profundizando en su transmisión y recepción, y desarrollar un software propio para la recepción de estas señales. Primero, se va a realizar una búsqueda bibliográfica para explicar el funcionamiento de las señales transmitidas, incluyendo el tipo de modulación, los sensores utilizados y el formato de las imágenes recibidas. En segundo lugar, se va a documentar el software utilizado para el experimento, detallando el desarrollo del esquema de GNU Radio para la recepción de la señal y el código en Matlab para la decodificación y visualización de las imágenes en formato Automatic Picture Transmission (APT). Finalmente, se va a desarrollar y validar el software realizado con señales de radiofrecuencia recibidas directamente de los satélites. De esta forma se van a validar ambos programas: el código GNU Radio, realizando un experimento de recepción de las señales APT en la estación terrena de la ETSIT y el código Matlab, que decodifica las imágenes, tanto de archivos de audio preexistentes como de las señales obtenidas de los satélites NOAA en la ETSIT. Durante el experimento, se optimizará el código de GNU Radio para cumplir los objetivos del trabajo. Así, se evaluará el cumplimiento de los objetivos y se sugerirán posibles pasos futuros para el proyecto.

## Resum

L'objectiu d'este projecte és estudiar els senyals dels satèl·lits meteorològics NOAA, aprofundint en la seua transmissió i recepció, i desenvolupar un software propi per a la recepció d'estos senyals. Primer, es realitzarà una cerca bibliogràfica per a explicar el funcionament dels senyals transmesos, incloent-hi el tipus de modulació, els sensors utilitzats i el format de les imatges rebudes. En segon lloc, es documentarà el software utilitzat per a l'experiment, detallant el desenvolupament de l'esquema de GNU Radi per a la recepció del senyal i el codi en Matlab per a la descodificació i visualització de les imatges en format Automatic Picture Transmission (APT). Finalment, es desenvoluparà i validar el software realitzat amb senyals de radiofreqüència rebudes directament dels satèl·lits. D'esta manera es validaran tots dos programes: el codi GNU Radio, realitzant un experiment de recepció dels senyals APT. en l'estació terrestre de la ETSIT i el codi Matlab, que descodifica les imatges, tant d'arxius d'àudio preexistents com dels senyals obtinguts dels satèl·lits NOAA en la ETSIT. Durant l'experiment, s'optimitzarà el codi de GNU Radio per a complir els objectius del treball. Així, s'avaluarà el compliment dels objectius i se suggeriran possibles passos futurs per al projecte.

## Abstract

The objective of this project is to study the signals from NOAA meteorological satellites, deepening in their transmission and reception, and to develop a self-developed software for the reception of these signals. First, a literature search will be carried out to explain the operation of the transmitted signals, including the type of modulation, the sensors used and the format of the received images. Secondly, the software used for the experiment will be documented, detailing the development of the GNU Radio scheme for signal reception and the Matlab code for decoding and displaying the images in Automatic Picture Transmission (APT) format. Finally, the software will be developed and validated with radio frequency signals received directly from the satellites.



In this way, both programs will be validated: the GNU Radio code, performing a reception experiment of the APT signals at the ETSIT ground station and the Matlab code, which decodes the images, both from pre-existing audio files and from the signals obtained from the NOAA satellites at ETSIT. During the experiment, the GNU Radio code will be optimized to meet the objectives of the work. Thus, the fulfillment of the objectives will be evaluated and possible future steps for the project will be suggested.

## RESUMEN EJECUTIVO

La memoria del TFG del Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación debe desarrollar en el texto los siguientes conceptos, debidamente justificados y discutidos, centrados en el ámbito de la ingeniería de telecomunicación

CONCEPT (ABET)	CONCEPTO (traducción)	¿Cumple? (S/N)	¿Dónde? (páginas)
1. IDENTIFY:	1. IDENTIFICAR:		
1.1. Problem statement and opportunity	1.1. Planteamiento del problema y oportunidad	S	1, 3-7, 68
1.2. Constraints (standards, codes, needs, requirements & specifications)	1.2. Toma en consideración de los condicionantes (normas técnicas y regulación, necesidades, requisitos y especificaciones)	S	41, 42, 31, 36
1.3. Setting of goals	1.3. Establecimiento de objetivos	S	1-2, 49
2. FORMULATE:	2. FORMULAR:		
2.1. Creative solution generation (analysis)	2.1. Generación de soluciones creativas (análisis)	S	31-40, 67, 68
2.2. Evaluation of multiple solutions and decision-making (synthesis)	2.2. Evaluación de múltiples soluciones y toma de decisiones (síntesis)	S	25-30, 41-58
3. SOLVE:	3. RESOLVER:		
3.1. Fulfilment of goals	3.1. Evaluación del cumplimiento de objetivos	S	59-66, 68
3.2. Overall impact and significance (contributions and practical recommendations)	3.2. Evaluación del impacto global y alcance (contribuciones y recomendaciones prácticas)	S	68, 74

## Índice

Capítulo 1.	Introducción y objetivos.....	1
1.1	Introducción.....	1
1.2	Objetivos.....	1
Capítulo 2.	Estado del arte.....	3
2.1	La Carrera Espacial.....	3
2.1.1	Historia .....	3
2.1.2	Legado .....	4
2.1.3	Futuro .....	5
2.2	Satélites meteorológicos y teledetección .....	5
2.2.1	Satélites meteorológicos.....	6
2.2.2	Teledetección.....	6
Capítulo 3.	Satélites NOAA y parámetros orbitales .....	8
3.1	Historia de los NOAA.....	8
3.2	Señales APT.....	11
3.2.1	Barrido satelital .....	11
3.2.2	Estructura.....	13
3.2.3	Formato de la trama .....	14
3.3	Elementos orbitales.....	16
3.3.1	Descripción de los elementos orbitales .....	16
3.3.2	Órbitas .....	17
3.3.3	Cálculos de los elementos orbitales.....	20
3.3.4	Cálculos tiempo de visibilidad .....	22
Capítulo 4.	Software utilizado .....	26
4.1	GNU Radio Companion.....	26
4.2	Matlab.....	27
4.3	¿Por qué GNU Radio y Matlab? .....	28
4.3.1	Airspy SDR .....	28
4.3.2	WXtoImg y noaa-apt.....	29



Capítulo 5.	Primeras versiones de los programas desarrollados .....	31
5.1	Esquema GNU Radio Companion .....	31
5.2	Script MatLab .....	36
Capítulo 6.	Estación terrena ETSIT .....	41
6.1	Restricciones del proyecto .....	41
6.2	Hardware utilizado.....	42
6.2.1	Antena utilizada.....	42
6.2.2	Equipamiento estación terrena .....	44
Capítulo 7.	Desarrollo del experimento .....	49
7.1	Introducción al experimento .....	49
7.2	Experimento.....	49
7.2.1	Primer día .....	49
7.2.2	Segundo día .....	50
7.2.3	Planificación tercer día .....	51
7.2.4	Tercer día.....	54
Capítulo 8.	Resultados .....	59
8.1	Resultado decodificador en Matlab .....	59
8.2	Esquema final GNU Radio .....	63
Capítulo 9.	Conclusiones .....	67
Bibliografía .....		69
Anexo I:	Ejercicio alumnos de bachillerato o ciclos formativos:.....	71
Anexo II:	Código Matlab .....	72
	Código Principal Matlab: .....	72
	Función posición_inicial: .....	74
Anexo III:	RELACIÓN DEL TRABAJO CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE DE LA AGENDA 2030 .....	76
Anexo IV:	Referencias a las imágenes.....	77

## Capítulo 1. Introducción y objetivos

### 1.1 Introducción

Hoy en día, los satélites son objeto de discusión por gran parte de la población, sobre todo por el programa Starlink y las grandes hileras de satélites que son observables desde la Tierra.

Los satélites son una parte muy importante de nuestra vida, ya que de forma cotidiana hacemos uso de ellos ya sea con el GPS, televisión por satélite, previsión del clima, etc. Es un mundo que para la mayor parte de gente está por explorar, y qué mejor forma de explorar este mundo que investigando y documentando la historia y el funcionamiento de los satélites, interactuando con ellos y enseñando a los más jóvenes sobre el tema.

Por ello, en este trabajo se realizará una investigación de la historia del hombre en el espacio y de los satélites que sobrevuelan nuestras cabezas en todo momento. Tras esta investigación, el trabajo se centrará en el funcionamiento, la historia y la recepción de los satélites NOAA. Por último, tras la evaluación de los resultados y las conclusiones, en el ANEXO 1, se incluirá una actividad que puede ser realizada a los alumnos de institutos que realicen visitas a la ETSIT utilizando el proyecto como objeto divulgativo para las nuevas generaciones que pueden aterrizar en nuestra escuela.

Los pasos que seguir en el proyecto son los siguientes:

- 1) Investigación de la carrera espacial y los satélites, centrándose en los NOAA.
- 2) Diseñar el procesado para la recepción y decodificación de la señal, para obtener la imagen transmitida, utilizando para la recepción de la señal un SDR (Software Designed Radio).
- 3) Decodificación y visualización de la imagen.
- 4) Desarrollo del experimento en la estación terrena de la ETSIT con la finalidad de probar el software diseñado.
- 5) Descripción de los resultados obtenidos y comprobación de objetivos.
- 6) Desarrollo de una actividad divulgativa para estudiantes de instituto o ciclos formativos que les ayude a entender el funcionamiento de los satélites.

### 1.2 Objetivos

El objetivo principal del proyecto es conseguir una correcta recepción y decodificación de las imágenes que capturan los satélites NOAA. Para ello se separan en los siguientes puntos:

- 1) Conocer el funcionamiento de los satélites NOAA, enfocándose en el sistema de transmisión de imágenes llamado APT (Automatic Picture Transmission).
- 2) Con los conocimientos adquiridos anteriormente, conseguir una correcta recepción de la señal APT, pudiendo diferenciar de forma clara la señal que se recibe y escuchar correctamente los pulsos característicos de estas señales con el menor ruido de fondo posible.
- 3) Decodificar la señal mediante Matlab y visión de una imagen lo más nítida posible con la posibilidad de guardar la imagen como PNG.



- 4) Detallar trabajos futuros del proyecto y propuestas de mejora para el software desarrollado.

Por lo tanto, los objetivos marcados exigen la resolución del diseño casi completo de la recepción de satélites NOAA, es decir, el diseño de los programas a utilizar y los conocimientos necesarios para diseñar estos programas.

## Capítulo 2. Estado del arte

### 2.1 La Carrera Espacial

#### 2.1.1 Historia [1]

La Guerra Fría supuso un enfrentamiento entre las dos grandes potencias mundiales de finales del Siglo XX, los Estados Unidos y la Unión Soviética, por demostrar quién podía obtener la mejor tecnología espacial y quién la conseguiría primero.

Con el fin de la Segunda Guerra Mundial, tanto soviéticos como estadounidenses capturaron científicos alemanes especializados en cohetes y misiles. En especial, los estadounidenses alistaron en sus filas al alemán Werner Von Braun, quien lideraría el desarrollo del programa espacial. En el otro bando, el programa espacial soviético lo lideraría el ingeniero soviético de origen Ucraniano Serguei Koroliov.

A mediados de los años 50, ambos bandos anunciaron que pondrían el primer satélite orbitando la Tierra, y cuando parecía que Estados Unidos se encontraba en cabeza para conseguir este logro, la Unión Soviética se adelantó lanzando el 4 de octubre de 1957 el Sputnik-1, siendo así el primer objeto hecho por el hombre en orbitar la Tierra.

Un año más tarde, en 1958, los Estados Unidos lanzarían su propio satélite, que llamarían Explorer-1, el cual fue diseñado por el equipo encabezado por Von Braun, iniciando la creación de una agencia federal que se dedicaría a la exploración espacial a la que llamarían NASA (National Aeronautics and Space Administration).

En el año 1961, la Unión Soviética volvería a dar un golpe sobre la mesa, siendo los primeros en mandar un hombre al espacio en el interior de la nave Vostok-1, el primer astronauta se llamaba Yuri Gagarin. Un mes más tarde, a bordo del Mercury Redstone 3, Alan Shepard se convirtió en el primer americano en llegar al espacio, y el segundo hombre en lograr este hito. Tras el logro americano de llevar a su propio astronauta al espacio, el presidente de los Estados Unidos, John F. Kennedy, anunció que antes de terminar la década de los 60, los Estados Unidos conseguirían llevar a un hombre a la Luna. A partir de ese momento, en Estados Unidos se dio comienzo al programa Apolo.

El programa Apolo se basó en encontrar solución a todos los problemas técnicos que existían para llegar a la Luna, y esto supuso que se convirtiera en un hito en el desarrollo de la tecnología espacial, desarrollando nuevos cohetes, como el Saturno-V, módulos lunares, trajes espaciales y nuevos y modernos sistemas de navegación. Durante su desarrollo se realizaron misiones tripuladas y no tripuladas, ambas con mucha importancia. Las no tripuladas fueron muy importantes para probar la tecnología de lanzamiento, navegación, solución de problemas de seguridad para astronautas, etc. Mientras que con las misiones tripuladas se consiguió probar las nuevas tecnologías de monitorización de constantes, paseos en el espacio y la más importante, revisiones en el diseño de las cápsulas tras accidentes que fueron mortales para los astronautas, como ocurrió con el Apolo-1. El objetivo principal por el que se lanzó el programa Apolo fue logrado en el año 1969, cuando Neil Armstrong se convirtió en el primer hombre en pisar la Luna a bordo del Apolo 11. Tras este hito, se realizaron 6 misiones más de aterrizaje lunar con los Apolo 11, 12, 14, 15, 16 y 17, teniendo un fallo con el Apolo 13, que no logró alunizar.

De esta manera, se decreta de forma histórica que a pesar de que los Estados Unidos fueron en segundo lugar durante toda la carrera espacial, estos fueron los ganadores de esta debido a que los soviéticos fallaron hasta en cuatro ocasiones el aterrizaje en la Luna. De esta forma, los astronautas estadounidenses fueron presentados como héroes nacionales, mientras que los soviéticos fueron retratados como los perdedores de la historia.

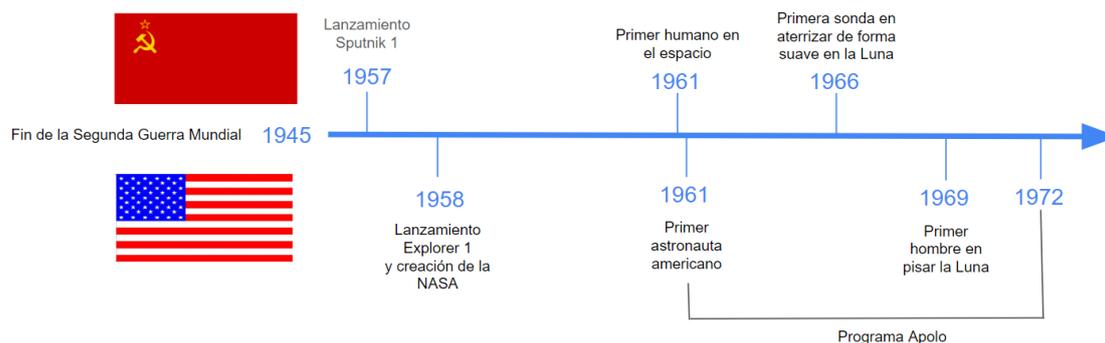


Figura 1. Cronología Carrera Espacial.

### 2.1.2 Legado [2]

Así como hoy en día las mejoras en la tecnología de los vehículos vienen de la mano de las carreras como la Formula 1 o la Moto GP, los avances en las telecomunicaciones y las mejoras en las tecnologías actuales vienen de la mano de las guerras. La Segunda Guerra Mundial nos trajo la bomba atómica y un par de décadas más tarde, la Guerra Fría nos trajo muchos de los mayores avances en la tecnología para llegar a lo que tenemos hoy en día gracias a la carrera espacial.

Hoy en día, hay parte de la población a la que si le preguntas si le afecta en su día a día que el hombre llegase al espacio, diría que no, pero esto no es del todo así, ya que, si en algún momento ha necesitado una comunicación global instantánea, ha hecho uso de internet o ha visualizado televisión por satélite, su afirmación ya no es válida. Nuestra vida sería radicalmente distinta a la que tenemos hoy en día sin la llegada del hombre al espacio. Ya que en nuestra vida cotidiana hacemos uso de estos avances tecnológicos, porque la carrera espacial no impulsó tan solo los avances en la tecnología espacial, sino que impulsó nuevas tecnologías que, aunque en un principio fueran de uso militar, llegaron a la población civil para hacer nuestra vida mucho más sencilla.

La exploración espacial de finales del Siglo XX fue fundamental para el desarrollo tecnológico de las telecomunicaciones. Los satélites de telecomunicaciones, los sistemas GPS y la transmisión de datos son solo algunos de los ejemplos de usos cotidianos de las telecomunicaciones implementadas gracias a la llegada al espacio. La necesidad de superar desafíos técnicos que ofrecía el viaje al espacio se tradujo en la creación de nuevas tecnologías y nuevos enfoques en la ingeniería, esto se traduce en la necesidad de crear tecnologías electrónicas de pequeñas dimensiones que se utilizan hoy en día tanto en móviles, relojes inteligentes y ordenadores. La exploración espacial no afectó solo al campo de las telecomunicaciones o tecnología de uso militar, sino que también afectó a los campos de la salud y de la medicina. Durante el transcurso del programa Apolo, surgió la necesidad de controlar la salud de los astronautas a distancias mayores de 380.000 km, y para ello se desarrollaron sistemas de monitorización biomédica para poder realizar un seguimiento de sus constantes vitales a grandes distancias. Además, se empezaron a desarrollar experimentos en microgravedad para el desarrollo de nuevos tratamientos médicos y desarrollo de nuevos materiales con aplicaciones directas en la medicina.

Sin la llegada del hombre al espacio, viviríamos actualmente en un mundo con una tecnología mucho más limitada. Los avances como la comunicación instantánea o algunos avances en la medicina podrían no haberse producido aún y tardar mucho más tiempo en desarrollarse. La exploración espacial ha sido fundamental para impulsar el avance tecnológico y, en última instancia, ha dado forma al mundo en el que vivimos.

### 2.1.3 Futuro [3]

El espacio sigue siendo la próxima frontera en la exploración humana. Aunque la llegada al espacio fue hace ya más de 50 años, sigue siendo todo un misterio lo que podremos encontrar ahí fuera. Sí, es cierto que los astrónomos pueden observar el espacio profundo, gracias a telescopios como el James Webb, pero solo se pueden realizar suposiciones sobre la estructura, composición, formación y otras características de lo que se observa. Todo esto por limitaciones como el presupuesto y la falta de tecnología más avanzada.

Uno de los objetivos de esta nueva era de la exploración espacial, es la posibilidad de explorar asteroides y objetos cercanos a la Tierra (NEOs). Para ello se realizarán misiones robóticas para poder estudiar la composición de asteroides y la viabilidad de extraer sus recursos.

Alejándonos de la Tierra, la NASA siempre ha tenido el objetivo de explorar otros planetas y salir de nuestro sistema solar. Para ello ya existen sondas como las Voyager 1 y 2. La Voyager 2, que se puede observar en la Figura 2, ya se encuentra a más de 13.300 millones de kilómetros de la Tierra, ha descubierto diez lunas antes desconocidas y realizó una foto de Neptuno en el año 1989.



Figura 2. Sonda Voyager 2.

Centrándonos en empresas privadas como SpaceX, su objetivo principal nunca ha sido un secreto, ya que a su CEO Elon Musk siempre le ha obsesionado este objetivo: la exploración humana en Marte. Junto a la NASA, trabajan codo con codo realizando investigaciones y pruebas para el desarrollo de las tecnologías que harán posible una misión tripulada a Marte en un tiempo no muy lejano.

Acercándonos de nuevo a la Tierra, la Luna siempre ha sido también el punto de mira para seguir con la exploración espacial. Gobiernos mundiales y empresas privadas planean establecer bases lunares, ya sean permanentes o semipermanentes, para investigar nuestra luna y desarrollar nuevas tecnologías para futuras misiones interplanetarias, incluso hacer de la Luna un destino turístico más.

A pesar de todas las limitaciones actuales, el futuro de la exploración espacial sigue siendo prometedor, al fin y al cabo, desde el primer vuelo de los hermanos Wright hasta llegar a la Luna solo pasaron 66 años, quién sabe qué nos depara el futuro.

## 2.2 Satélites meteorológicos y teledetección

Satélite: “Vehículo espacial, tripulado o no, que se coloca en órbita alrededor de la Tierra o de otro astro, y que lleva aparatos apropiados para recoger información y transmitirla.” Esta es la

definición de satélite que nos da la Real Academia Española de la Lengua. Existen diferentes tipos de satélites artificiales que orbitan sobre nosotros, como pueden ser los satélites de comunicaciones, navegación, astronómicos, reconocimiento y en los que nos vamos a centrar, en los satélites meteorológicos, su historia y su presente.

### 2.2.1 Satélites meteorológicos

Se trata de un tipo de satélite utilizado principalmente para la supervisión del tiempo y del clima atmosférico de la Tierra. Suelen tener una órbita polar con la que cubren la Tierra entera o pueden tener una órbita geostacionaria cubriendo siempre la misma zona del planeta. Las imágenes obtenidas durante los últimos años de estos satélites han ayudado a la monitorización de catástrofes como incendios o a prevenir a la población de nubes de cenizas provenientes de volcanes en activo.

El primer satélite meteorológico se lanzó en el año 1959, se llamó Vanguard 2, y estaba diseñado para medir capas de nubes, aunque no tuvo ningún éxito. Por este fracaso, el que se considera realmente el primer satélite meteorológico funcional es el TIROS-1, lanzado en 1960, el cual inició la red de satélites meteorológicos que tenemos en la actualidad. En la Figura 3 se puede observar el satélite Tiros-1. [4]



Figura 3. Satélite Tiros-1.

La gran mayoría de los satélites meteorológicos son de observación pasiva, es decir, tan solo reciben en sus sensores la propia radiación y la reflexión de la luz solar en los objetos de la Tierra que se encuentran visualizando. Por otra parte, los satélites de observación activa emiten radiación desde el sensor a su objetivo para que este la refleje y la reciba nuevamente el satélite en sus sensores. La observación se realiza mediante diferentes canales del espectro electromagnético que detectan los sensores embarcados en los satélites, principalmente en el espectro visible y en el infrarrojo.

### 2.2.2 Teledetección

La teledetección implica la captura de información que proporciona la superficie terrestre. Se utilizan sensores ubicados en satélites en diferentes órbitas. Al igual que en los satélites meteorológicos, estos sensores pueden ser pasivos o activos. Tras la obtención de los datos, estos son procesados y se extrae información significativa sobre las zonas de la Tierra de interés. La teledetección tiene sus raíces en las primeras formas de observación desde el aire, los globos

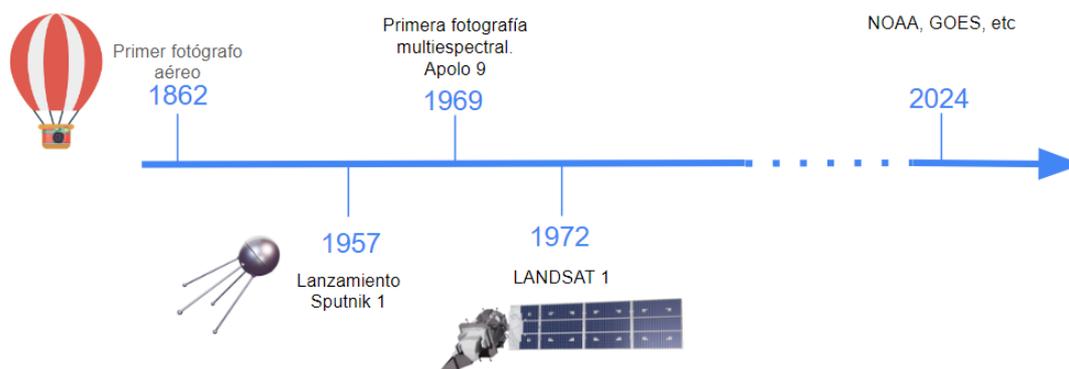
aerostáticos y la invención de la fotografía en el Siglo XIX. En la era moderna, la teledetección da comienzo en el año 1957 con el Sputnik-1.

El TIROS-1, empleaba una cámara de televisión de muy baja resolución que como mucho podía discriminar entre nubes, agua, hielo, etc. Pero la primera fotografía multispectral realizada fue en el vuelo tripulado del Apolo 9 en el año 1969, que sirvió para el estudio de los recursos terrestres.

El primer satélite utilizado específicamente para la teledetección fue el LANDSAT 1, lanzado en el año 1972, y más adelante le siguieron los sucesores de su misma serie. A través de los datos recopilados por satélites LANDSAT, numerosos países decidieron crear sus propios programas para la teledetección, la ESA creó los satélites ERS y Japón los MOS. [5]

La teledetección ha evolucionado en los últimos años, ya no es específica para la observación de recursos naturales, sino que se utiliza desde para medir la ocupación y uso del suelo, el análisis y predicción meteorológicas, hasta para la prevención de desastres para la agricultura o el espionaje militar. Actualmente existen decenas de satélites dedicados a la observación de la Tierra, tanto de uso civil como de uso militar.

En la Figura 4 se puede observar una breve cronología de la historia de la teledetección, iniciando con los globos aerostáticos, pasando por los satélites meteorológicos, llegando a la actualidad con los NOAA y GOES



**Figura 4. Cronología de la teledetección.**

## Capítulo 3. Satélites NOAA y parámetros orbitales

### 3.1 Historia de los NOAA [6] [7] [8]

Los satélites NOAA son la tercera generación de satélites polares de los Estados Unidos, que se conocían anteriormente como satélites TIROS. Esta generación de satélites comenzó con el lanzamiento en 1970 del NOAA 1. Al contrario que en satélites anteriores, cuya forma era la de un prisma de 18 caras, los NOAA tenían una forma prácticamente cúbica. La estabilización de anteriores satélites se basaba en la estabilización en spin, los satélites giraban sobre su eje central a una velocidad constante creando un momento angular que ayudaba a mantener su estabilidad, y se pasó en esta generación a una estabilización en 3 ejes, que se realiza mediante el control activo de la orientación en 3 ejes: roll, pitch y yaw. Este cambio permitió una mayor maniobrabilidad y un control más preciso sobre el satélite, también provocó que la calidad de las imágenes y el tiempo en la que se podía ver la imagen aumentaran de forma notable. El NOAA 1, que se puede observar en la Figura 5, fue el último satélite en el que se incluyeron cámaras de televisión.

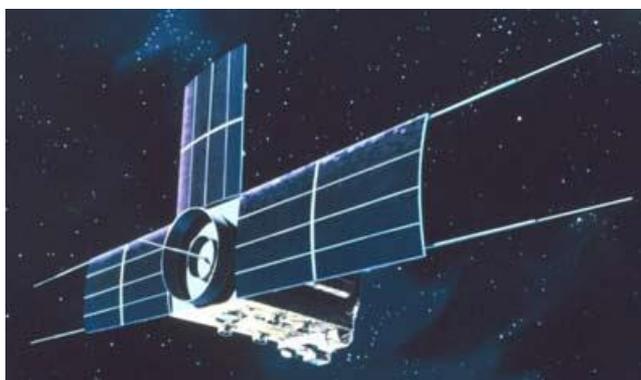


Figura 5. Satélite NOAA 1.

En el año 1972 se lanzó el NOAA 2, el cual incluía en su carga útil el sensor VHRR (Very High Resolution Radiometer), que mejoró en gran medida la calidad de las imágenes y podía captar la temperatura de la superficie de la Tierra, la temperatura de las nubes y la de mares y océanos. Todo ello en cualquier momento del día, gracias a la incorporación de un radiómetro de 2 canales que cubría el espectro visible (VIS) y el infrarrojo (IR).

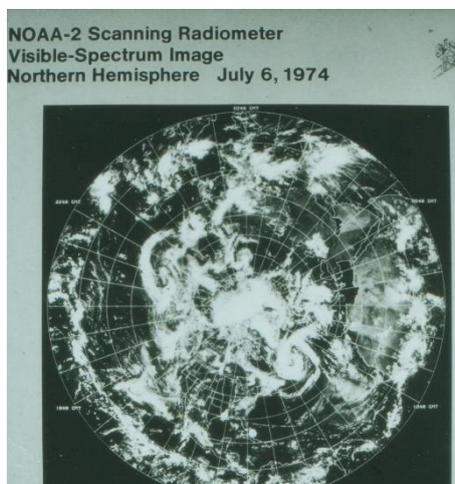
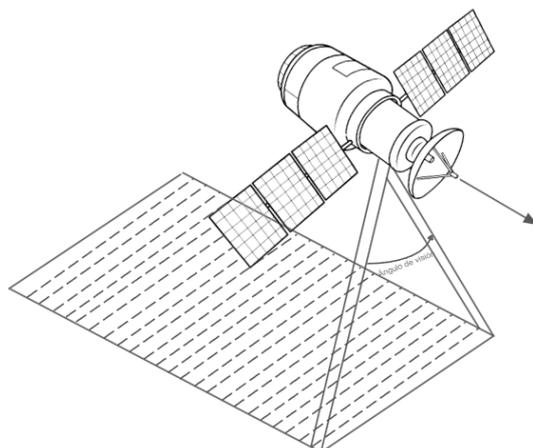


Figura 6. Imagen VIS del NOAA 2.

Mediante un complejo sistema, el sensor VHRR giraba y realizaba un barrido de  $360^\circ$  perpendicular al eje de rotación del satélite, de los  $360^\circ$  se escogía un arco que pertenecía al trayecto en el que el barrido apuntaba a la Tierra, se puede observar de forma sencilla el funcionamiento en la Figura 7. El sensor tenía una velocidad de rotación de 400 revoluciones por minuto (rpm), por lo que realizaba 400 escaneos de la zona deseada cada minuto. [9]



**Figura 7. Funcionamiento sensor VHRR.**

La tercera generación de satélites polares seguiría con los satélites NOAA 3, NOAA 4 y NOAA 5, pero estos no incluyeron ningún cambio importante para la teledetección. La generación terminó tras el lanzamiento del último satélite en 1976.

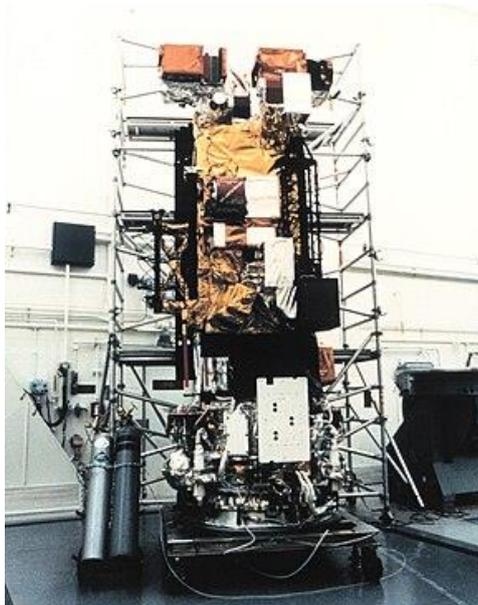
La cuarta generación de satélites polares, o la segunda generación de satélites NOAA, se dividió en dos partes. En la primera se lanzaron 3 satélites, TIROS-N, NOAA 6 y NOAA 7. Tuvo una duración de 9 años entre 1978 y 1987, se le dio continuidad a la serie TIROS, e incluyó nuevos instrumentos de teledetección como el nuevo sensor AVHRR. El primer satélite en embarcar el AVHRR fue el TIROS-N, Figura 8, pero al final de esta primera parte de la generación, en el NOAA 7, se embarcó el AVHRR/2 por primera vez. También se mejoró el tiempo de vida de los satélites al doblar el de la generación anterior, llegando a los 3 años de funcionamiento.

En la segunda parte de la cuarta generación se incluyó la denominación POES (Polar Operational Environmental Satellites), diferenciándose de la primera parte en un mayor rendimiento y funcionalidades mejoradas, llamándose ATN (Advanced TIROS-N).



**Figura 8. TIROS-N.**

Por último, llegaría la quinta generación, que todavía sigue en funcionamiento, siendo su primer lanzamiento en el año 1998 con el NOAA 15, que lo vemos en la Figura 9. Se implementaron mejoras en los dispositivos embarcados, empezando a incluir en el NOAA 15 el sensor AVHRR/3, que es una versión mejorada de los sensores AVHRR ya utilizados en la anterior generación. El tiempo estimado de funcionamiento de esta generación era de 3 años al igual que en anteriores generaciones, pero el primero de esta generación, como se ha dicho anteriormente, sigue en funcionamiento desde el año 1998, siendo uno de los 3 satélites principales con los que los radioaficionados siguen experimentando con sus señales APT.



**Figura 9. Satélite NOAA 15.**

Los siguientes satélites de esta quinta generación fueron los NOAA 16 y NOAA 17, lanzados en los años 2000 y 2002 respectivamente. Tenían unas características muy similares a las del NOAA 15, pero estos dejaron de estar en activo en 2014 y 2013. Los problemas que causaron que dejaran de funcionar correctamente fueron los siguientes: en el NOAA 16, la señal APT dejó de funcionar y dejó de ser útil, mientras que en el NOAA 17 el sensor AVHRR se apagó en el año 2010, dejando el satélite en funcionamiento 3 años más. Y para terminar con la quinta generación, se lanzaron en 2005 y 2009 los NOAA 18 y NOAA 19 respectivamente. Estos satélites todavía siguen en activo, siendo al igual que el NOAA 15 uno de los satélites con los que se experimenta en la radioafición, y en los que basaremos el proyecto.

En la Figura 10 se puede ver una cronología de los satélites NOAA donde se indica en color verde los 2 años de funcionamiento esperado, en azul los años esperados más allá de los 2 años y, por último, en azul claro los años que se esperaba que funcionase un satélite como respaldo de la siguiente generación.

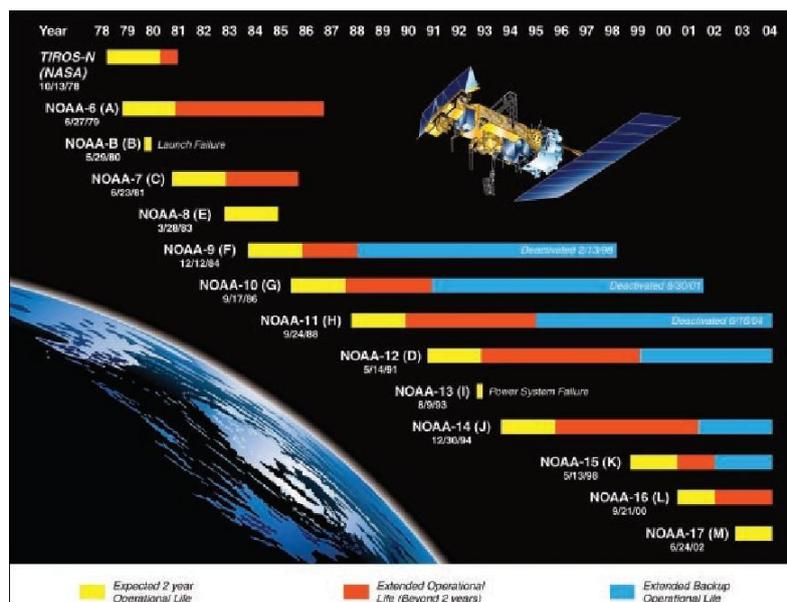


Figura 10. Cronología satélites NOAA.

## 3.2 Señales APT

El formato APT, llamada así por sus siglas en inglés Automatic Picture Transmission, fue un formato de señal desarrollado en Estados Unidos por el National Earth Satellite Service. Se trata de un sistema de transmisión que se creó en la década de los 60 para el uso de satélites meteorológicos, el primer satélite en utilizarlo fue el TIROS 8, el cual proporcionaba imágenes a tiempo real de las nubes a cualquier estación terrena propiamente equipada. Al TIROS 8 le siguieron los NIMBUS I y el TIROS N, y como último satélite hasta el momento el NOAA 19.

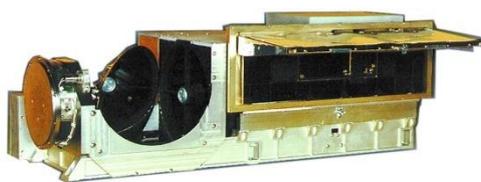
Los satélites de la quinta generación que siguen en activo, los NOAA 15, NOAA 18 y NOAA 19 transmiten las imágenes que captan mediante formato APT. La señal transmite de forma continua imágenes de muy baja resolución desde el radiómetro AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) en 2 bandas de 6 disponibles, la infrarroja para poder visualizar imágenes a cualquier hora del día y otra banda para visualizar imágenes durante las horas de sol. La información se transmite continuamente como una señal analógica, que se puede recibir y decodificar a tiempo real con una estación terrena y software adecuados, para ello el satélite debe encontrarse en el rango visible de la estación.

### 3.2.1 Barrido satelital

#### 3.2.1.1 Sensor AVHRR

El sensor AVHRR, Figura 11, es parte de la carga útil de los satélites NOAA, proporciona información radioeléctrica de las zonas visible e infrarrojas del espectro de frecuencias, complementando las funciones de observación meteorológica de la Tierra. Como se ha comentado anteriormente, los primeros satélites en llevar embarcado este sensor fueron los TIROS.

Se trata de un escáner de banda ancha que captura radiación proveniente de la superficie de la Tierra, por lo que es de observación pasiva, esto lo realiza en múltiples longitudes de onda del espectro. Mediante el análisis multiespectral de las imágenes que proporciona, se pueden medir parámetros meteorológicos como la cobertura de las nubes o la temperatura de la superficie.



**Figura 11. Sensor AVHRR.**

Han existido 3 versiones de este sensor, el AVHRR, AVHRR/2 y AVHRR/3. El primero de ellos, el AVHRR, se utilizó desde el año 1979 hasta el 2001. Lo embarcaban los satélites NOAA 6, 8, 10 y el TIROS N. Contenía un radiómetro de 4 canales que cubría el espectro visible (VIS), el infrarrojo cercano (NIR), el infrarrojo medio (MWIR) y el infrarrojo térmico (TIR). Tenía una resolución del IFOV de 1,1 km por píxel y una resolución radiométrica de 10 bits. [10]

Central wavelength	Spectral interval
0.615 $\mu\text{m}$	0.55 - 0.68 $\mu\text{m}$
0.912 $\mu\text{m}$	0.725 - 1.10 $\mu\text{m}$
3.74 $\mu\text{m}$	3.55 - 3.93 $\mu\text{m}$
11.0 $\mu\text{m}$	10.5 - 11.5 $\mu\text{m}$

**Figura 12. Canales AVHRR.**

La segunda versión del sensor, el AVHRR/2, fue algo más longevo, utilizándose desde el año 1981 hasta el 2008. Se embarcó en los satélites NOAA 7, 9, 11, 12, 13 y 14. Se pasó de 4 canales a 5, tan sólo añadiendo un canal más de infrarrojo lejano, misma resolución del IFOV y misma resolución radiométrica que su predecesor. [11]

Central wavelength	Spectral interval
0.615 $\mu\text{m}$	0.55 - 0.68 $\mu\text{m}$
0.912 $\mu\text{m}$	0.725 - 1.10 $\mu\text{m}$
3.74 $\mu\text{m}$	3.55 - 3.93 $\mu\text{m}$
10.80 $\mu\text{m}$	10.3 - 11.3 $\mu\text{m}$
12.00 $\mu\text{m}$	11.5 - 12.5 $\mu\text{m}$

**Figura 13. Canales AVHRR/2.**

Por último, el sensor AVHRR/3, el cual se estima que tendrá un periodo de uso mayor que sus antecesores, se embarcó por primera vez en el año 1998 y se estima que se utilizará hasta el año 2027. Está montado en los satélites NOAA 15, 16, 17, 18, 19, Metop A, B y C, de los que solo quedan en funcionamiento de los NOAA, los NOAA 15, 18 y 19 y de los Metop, los Metop B y C. Se volvió a incluir un canal más en el radiómetro, teniendo ahora 6 canales cubriendo el espectro de frecuencias. El canal añadido cubre el infrarrojo de onda corta (SWIR). [12]

Central wavelength	Spectral interval
0.630 $\mu\text{m}$	0.58 - 0.68 $\mu\text{m}$
0.862 $\mu\text{m}$	0.725 - 1.00 $\mu\text{m}$
1.61 $\mu\text{m}$	1.58 - 1.64 $\mu\text{m}$
3.74 $\mu\text{m}$	3.55 - 3.93 $\mu\text{m}$
10.80 $\mu\text{m}$	10.3 - 11.3 $\mu\text{m}$
12.00 $\mu\text{m}$	11.5 - 12.5 $\mu\text{m}$

Figura 14. Canales AVHRR/3.

En las Figuras 12, 13 y 14 observamos los canales de cada uno de los 3 radiómetros AVHRR que se han utilizado hasta la fecha.

Los satélites que se utilizarán a lo largo del proyecto, como se ha dicho anteriormente, son los que embarcan el sensor AVHRR/3. Para describir la huella satelital de este sensor, necesitamos conocer dos términos relacionados con la imagen de la huella del satélite sobre la superficie terrestre. El primero de los términos es el NADIR, se trata del punto que se encuentra directamente debajo del sensor, la menor distancia desde el satélite hasta la superficie. El segundo de los términos es el SWATH, y es la cobertura de la huella perpendicular a la dirección de la órbita. Conociendo ambos términos, es sencillo describir la huella satelital como el barrido que realiza el sensor desde el NADIR hasta el SWATH en ambas direcciones, en este caso se barre desde  $0^\circ$ , el NADIR, hasta  $55,4^\circ$  a ambos lados, se observa de forma más sencilla en la Figura 15.

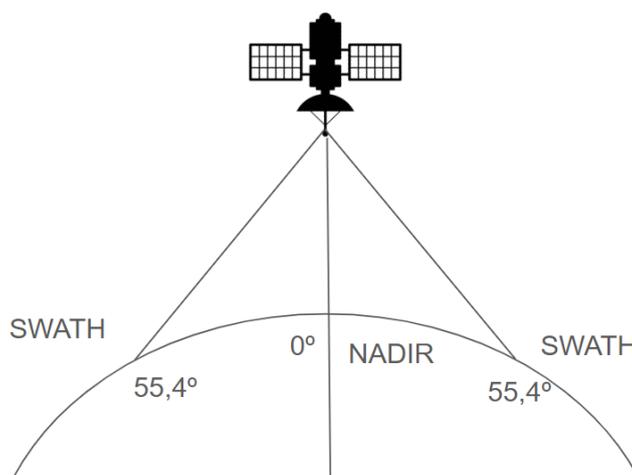


Figura 15. Huella satelital.

El recorrido completo desde un extremo del SWATH hasta el NADIR equivale a aproximadamente 1300 km sobre la superficie, por lo que el barrido total de la huella satelital es de aproximadamente 2600 km.

### 3.2.2 Estructura

La señal se modula con una portadora de FM, con una subportadora de AM a una frecuencia de 2,4 kHz, y una potencia de 5W. Cada uno de los 3 satélites transmite en una frecuencia diferente, entre los 137,1 y 137,92 MHz.

Por cada palabra, el AVHRR extrae 10 bits de información de los que se seleccionan los 8 bits más significantes. Estos 8 bits nos dan los datos de la escala de grises disponible:  $2^8=256$  niveles de gris. [13]

Los satélites NOAA transmiten con una polarización circular a derechas (RHCP), es decir, las ondas en los ejes x e y del campo eléctrico están desfasadas  $90^\circ$  con la misma amplitud. Por lo que dependiendo de la polarización de la antena utilizada recibiremos la máxima potencia de señal o menos, ya que por ejemplo si utilizásemos en la recepción una antena con polarización lineal, la constante de acoplamiento es 0.5, si se utiliza una antena circular a izquierdas la constante de acoplamiento es 0, y para una máxima recepción de la señal necesitaríamos una antena circular a derechas, cuya constante de acoplamiento es de 1.

### 3.2.3 Formato de la trama [14]

La transmisión de imágenes consiste en un proceso cíclico que se repite cada 0,5 segundos, durante este periodo de tiempo se transmite una línea de la imagen, por lo que transcurridos 60 segundos se transmitirán un total de 120 líneas de la imagen. Durante los 0,5 segundos de transmisión de la línea, la trama se puede dividir en 4 partes que se repiten cada 0,25 segundos, por lo que tendremos la trama dividida en un total de 8 partes diferentes.

Dentro de los 0,5 segundos de transmisión de la imagen, en los primeros 0,25 segundos se tienen 39 palabras de sincronización de la señal A, le siguen 47 palabras que sirven como marcador de tiempo, más la imagen de 909 palabras y por último la información de telemetría compuesta de 45 palabras. Se repite el mismo proceso para los siguientes 0,25 segundos, pero con la imagen del canal B. Todo esto hace un total de  $(39 + 47 + 909 + 45) \times 2 = 2080$  palabras por línea, 2080 palabras cada 0,5 segundos. En la Figura 16 vemos un esquema de cómo se reparten las palabras a lo largo de la línea.

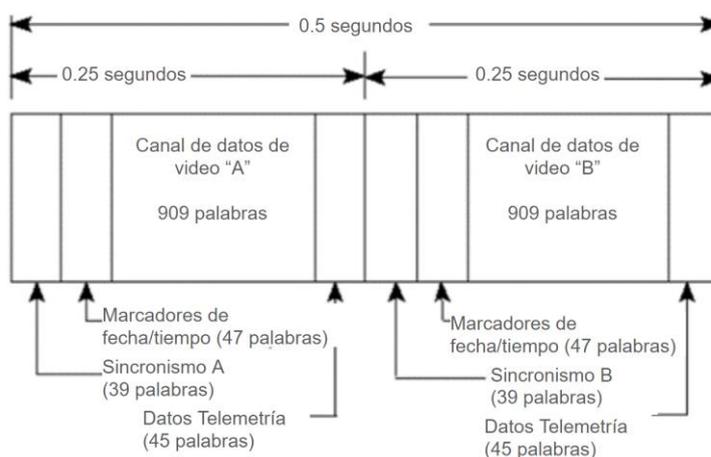


Figura 16. Una línea de la señal APT.

A continuación, en la Figura 17 se muestra un ejemplo de imagen obtenida con el software noaa-apt en la que se detalla cada una de las partes de la imagen:

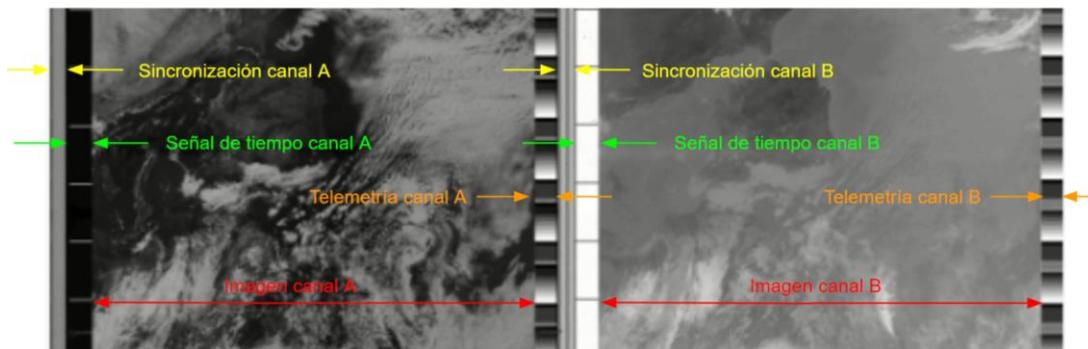


Figura 17. Imagen detallada.

En la Figura 17 se observa que cada una de las imágenes recibidas por los canales A y B tienen sus propias tramas de sincronización y de telemetría.

Cada trama de telemetría está formada por 16 tramos de 8 líneas repetidas sucesivamente cada uno, obteniendo un total de 128 líneas cada trama, por lo que cada 64 segundos obtenemos una trama completa. Los marcadores de tiempo y espacio proporcionan las referencias temporales para la correcta recepción de la imagen. Se encuentran al inicio de la trama y están compuestos por una sucesión de 4 líneas, de las cuales 2 son blancas y 2 son negras. El tiempo entre dos marcadores es de 60 segundos. En la Figura 18 se observa todas las partes de una trama completa transmitida por un NOAA.

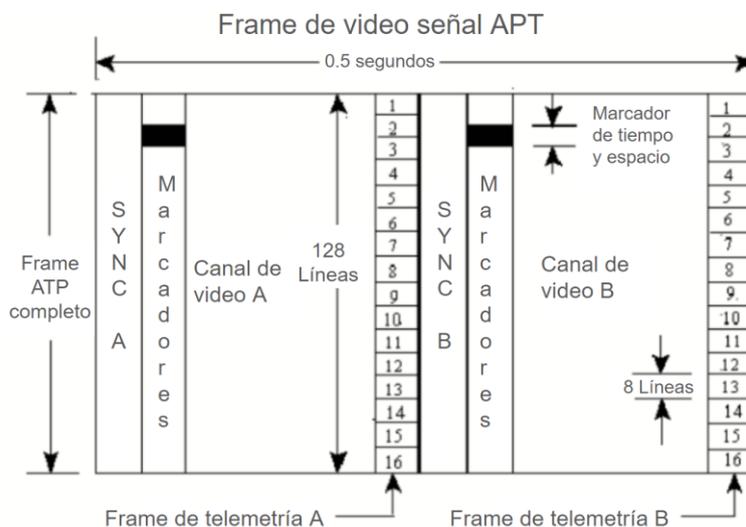


Figura 18. Trama completa indicando cada parte.

Por último, tenemos la señal de sincronismo que se observa en la Figura 19, que tiene una duración de 40 periodos. Cada periodo está compuesto de  $1/4160$  segundos y son diferentes para cada canal que decodificamos. Para el canal A se tienen 7 ciclos de 1040 Hz con una duración de 4 periodos cada uno, la duración total es de 32 periodos. En el caso del canal B, se tienen 7 pulsos, con una duración de 832 pulsos por segundo, teniendo así dos tamaños de pulso, uno más grande de 3 periodos y uno más pequeño de 2, de esta forma se obtienen ciclos de 5 periodos y por lo tanto de 832 Hz.

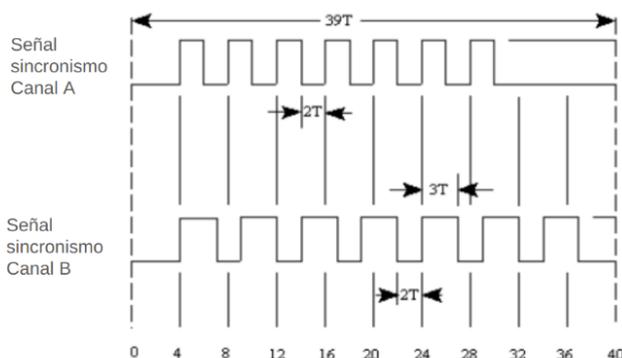


Figura 19. Señal de sincronismo.

### 3.3 Elementos orbitales

#### 3.3.1 Descripción de los elementos orbitales

En la mecánica celeste, los elementos orbitales son los parámetros esenciales para distinguir de manera única la trayectoria específica de un cuerpo celeste. Estos elementos se emplean en sistemas de dos cuerpos mediante una órbita de Kepler.

Los elementos de un cuerpo celeste, en nuestro caso un satélite, son un conjunto de seis elementos que permiten definir de forma inequívoca su órbita, de que solo hace falta saber con exactitud dos para definir la forma y el tamaño de una órbita.

Las órbitas se modelan siguiendo una forma elíptica, por ello se utiliza para el cálculo de las órbitas los parámetros más importantes de una elipse: el semieje mayor y la excentricidad. La excentricidad es la razón entre la distancia desde el centro de la elipse hasta uno de sus focos y el tamaño de su semieje mayor. El semieje mayor es la longitud máxima desde el centro de la elipse hasta su perímetro. A partir de estos dos datos podremos ser capaces de calcular la distancia del apogeo, perigeo, la velocidad en ambos puntos y el periodo de un satélite. El apogeo es la distancia entre la Tierra y el punto más alejado de la órbita del satélite, mientras que el perigeo es la distancia entre la Tierra y el punto más cercano de la órbita.

Además de la forma de la órbita, debemos tener en cuenta otras variables como la inclinación, definida por la letra  $i$ . Se trata de la inclinación vertical de la elipse con respecto al plano de referencia. Este plano de referencia es la línea horizontal que separa Norte y Sur, la inclinación varía entre los 0 y 180 grados y se calcula teniendo en cuenta cual es la dirección de referencia.

Otro parámetro que se debe tener en cuenta es la ascensión recta del nodo ascendente  $\Omega$ . Para tenerlo en cuenta, debemos conocer otros parámetros como los nodos ascendente y descendente, la línea nodal y el punto de Aries. Todos ellos están relacionados entre sí. El nodo ascendente es el punto donde la órbita cruza el plano ecuatorial moviéndose desde el hemisferio Sur al hemisferio Norte, mientras que el nodo descendente es el punto donde cruza del hemisferio Norte al hemisferio Sur. La línea nodal es la línea imaginaria que une los nodos ascendente y descendente y pasa por el centro de la Tierra. Y, por último, el punto de Aries, también conocido como punto vernal, es el punto donde el plano de la órbita aparente del Sol alrededor de la Tierra (eclíptica) cruza el ecuador celeste, es el punto que marca la primavera en el hemisferio norte. Conociendo estos cuatro parámetros, podemos definir la ascensión recta del nodo ascendente como la medida angular desde el punto de Aries a lo largo del ecuador celeste hasta el nodo ascendente.

El siguiente elemento es el argumento del perigeo  $\omega$ . Es el ángulo medido en el plano de la órbita de un satélite hasta el punto de perigeo, es decir, lo más cercano a la Tierra.

Por último, tenemos la anomalía verdadera. Es un parámetro que ayuda a la identificación de la posición de un satélite a lo largo de su órbita. Todos estos parámetros se observan en la Figura 20.

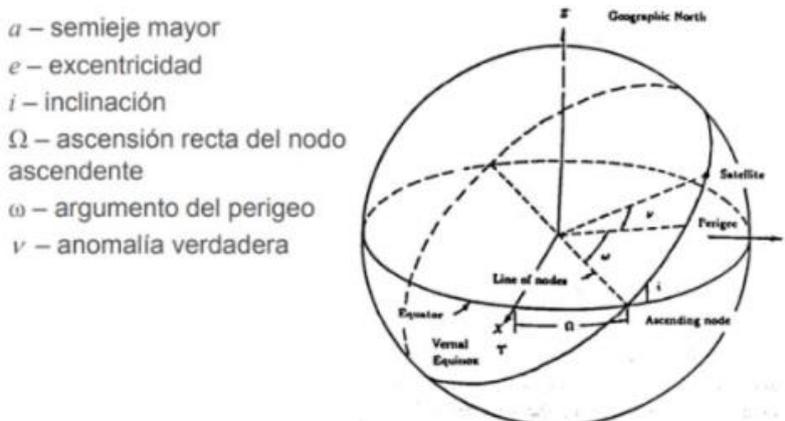


Figura 20. Elementos orbitales.

### 3.3.2 Órbitas

“Una órbita es la trayectoria curva que describe un cuerpo en su momento alrededor de un centro”. Esta es la definición de órbita según la RAE.

Al momento de situar un satélite en una órbita Terrestre, existen dos aspectos importantes, externos a la sincronía de la órbita o al periodo del satélite, que son los elementos gravitatorios que pueden afectar a la órbita y los Anillos de Van Allen. Entre estos elementos gravitatorios incluimos desde las fuerzas gravitatorias que provoca la Luna, el Sol u otros planetas, las fuerzas de presión de radiación emitidas por el Sol, hasta la fricción que causa la atmósfera sobre el cuerpo en órbitas bajas. El más importante de estos elementos es la forma de nuestro planeta, ya que realmente no es una esfera, si no que en ambos polos se achata de forma considerable. Es un planeta sin simetría de revolución sobre el eje vertical, es decir, no es simétrico. Para desarrollar los cálculos de las órbitas se utiliza un modelo de la Tierra tridimensional por desarrollo en serie.

Los Anillos de Van Allen se descubrieron con el lanzamiento del Explorer I, cuya carga científica había sido diseñada por un equipo dirigido por James Alfred Van Allen. Tras la obtención de los datos necesarios gracias al Explorer I, descubrieron que alrededor de la Tierra existen zonas con una mayor concentración de radiación que en otras, más en concreto zonas con partículas de alta energía que eran debidas al campo magnético terrestre. Estas dos zonas tienen una forma toroidal, separadas una de la otra por zonas sin tanta radiación, como se puede ver en la Figura 21.

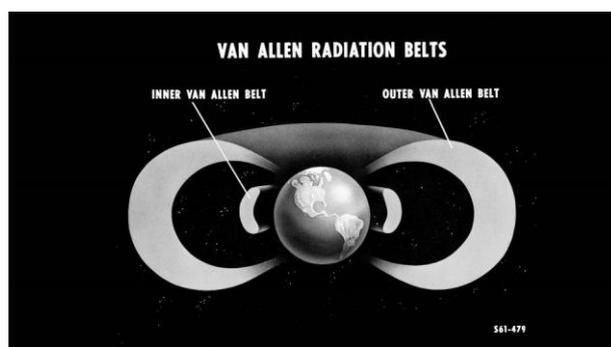


Figura 21. Anillos de Van Allen.

Si los satélites pasan por los Anillos de Van Allen, reciben una gran cantidad de radiación que perjudica a los equipos. El anillo inferior que vemos en la Figura 21 se sitúa entre los 2.000 y 6.000 kilómetros, y los anillos exteriores entre los 15.000 y los 30.000 kilómetros de altitud. Desde su descubrimiento, se evita que los satélites se encuentren en órbitas que atravesen los anillos, para así prevenir la interacción con la gran cantidad de radiación que recibirían. En consecuencia, se describen diferentes tipos de órbitas basadas en la altura a la que se ubica el satélite, siempre evitando los rangos de los Anillos de Van Allen.

### 3.3.2.1 Tipos de órbita por la altura

Para evitar los Anillos de Van Allen y tener una mejor organización de las distancias entre satélites y la Tierra, las órbitas se determinan en función de la altura.

Existen 4 tipos de órbitas que se identifican por la altura a la que se encuentran: GEO, LEO, MEO, HEO.

Las órbitas GEO son las órbitas geoestacionarias, se encuentran a aproximadamente 35.700 km de distancia de la Tierra. La característica principal que proporciona esta órbita es que los satélites situados en ella se mantienen estáticos sobre un punto de la superficie de la Tierra, su periodo coincide con el de un día sideral y su inclinación y excentricidad son de valor 0, son satélites que se encuentran sobre el ecuador de la Tierra. Las órbitas geoestacionarias tienen dos aspectos negativos, uno de ellos es que no cubre la zona polar y el segundo es la gran cantidad de combustible necesario para mantener al satélite en dicha órbita.

La órbita de tipo HEO (Highly Elliptical Orbit) es el tipo de órbita que trazó el satélite soviético Molniya-1. Fue una órbita altamente excéntrica cuyo perigeo era de 548 km y su apogeo sobrepasaba la órbita geoestacionaria a 39.000 km. Esto provocaba que, en su apogeo, pareciera que el satélite era prácticamente estático, y esto coincidía cuando se encontraba sobre Rusia, obteniendo así una pasada muy larga sobre el área designada de la Tierra. Hoy en día los satélites que orbitan las HEO, son satélites científicos, como por ejemplo el XMM-Newton, un satélite observatorio lanzado por la ESA con una órbita que tiene como perigeo 7.000 km de altura y como apogeo 114.000 km.

Las órbitas LEO son órbitas circulares bajas que oscilan entre los 500 y 1.500 km de altura. Los satélites con esta órbita presentan pocas pérdidas por propagación debido a la cercanía a la superficie de la Tierra, pero para obtener una cobertura más extensa sería necesario una gran cantidad de satélites en esta órbita. Tienen un periodo de aproximadamente 90 minutos. Pueden llegar a ser polares, y si lo son se denominan LEO polares. Solo los LEO polares pueden llegar a tener cobertura global, aunque esto provoca que existan una gran cantidad de satélites sobre los polos al mismo tiempo y hace que la cobertura esté altamente solapada.

Por último, tenemos las órbitas MEO. Son órbitas circulares medias que oscilan entre los 6.000 y 35.000 km, entre los satélites situados en LEO y GEO. Los satélites característicos de estas órbitas son los de posicionamiento y navegación, como los GPS y los GLONASS. Actualmente se han implantado constelaciones de satélites de alto rendimiento (HTS) en órbitas MEO que permiten una comunicación de datos de baja latencia utilizadas por gobiernos y organizaciones comerciales. A pesar de esto, al estar a mayor altura que los satélites ubicados en LEO, tienen una mayor latencia y por lo tanto actualmente no existen muchas constelaciones de baja latencia a estas alturas. Siendo las órbitas LEO las idóneas para estas constelaciones, ya que son las de menor latencia y mayor velocidad de transmisión.

En la Figura 22 podemos observar un dibujo de los 4 tipos de órbitas superpuestas y un ejemplo de satélite en cada una de las órbitas, donde se puede ver claramente las diferencias entre ellas:

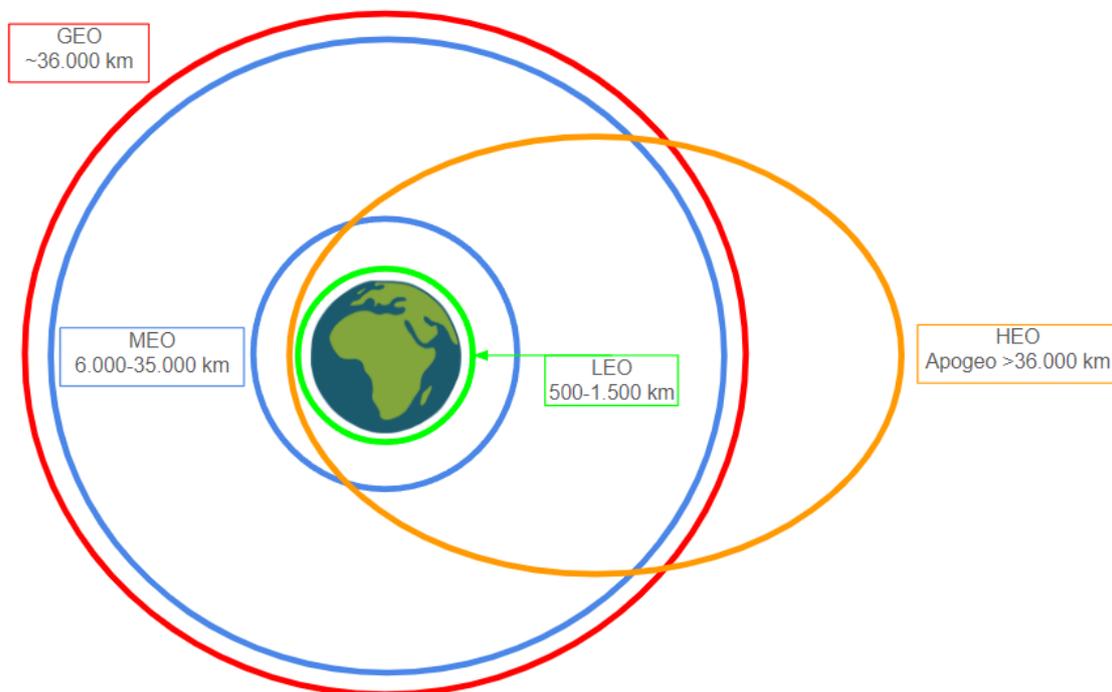


Figura 22. Comparación de órbitas.

### 3.3.2.2 Tipos de órbita por sincronía

Además de clasificar las órbitas por la altura a la que se encuentra el satélite en cuestión, se clasifican también en función del periodo orbital que cumplen. Estas pueden ser geosíncronas o heliosíncronas.

Las órbitas geosíncronas tienen un periodo múltiplo o submúltiplo del periodo de rotación de la Tierra, como las órbitas geoestacionarias que tienen el mismo periodo de rotación de la Tierra, o las Molniya, que su periodo es de aproximadamente la mitad del periodo de rotación de la Tierra. Se trata de una órbita que suele estar ocupada por satélites de comunicaciones, como los Intelsat o los Eutelsat, satélites meteorológicos, como los GOES, satélites de observación de la Tierra o satélites de navegación como los IRNSS. Y como podemos observar en la Figura 23, una órbita geosíncrona no tiene por qué ser geoestacionaria.

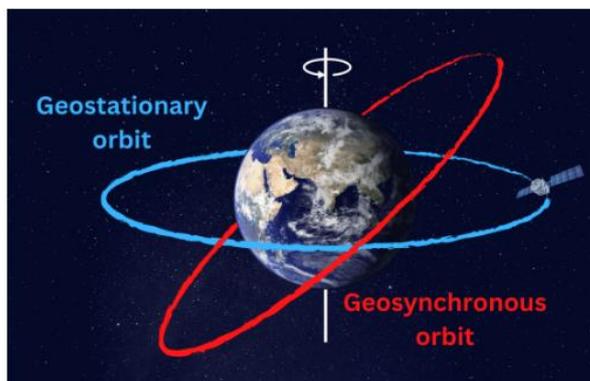


Figura 23. Comparación órbitas GEO y geosíncronas.

La característica principal de las órbitas heliosíncronas es que el satélite pasa sobre una determinada latitud terrestre en un mismo tiempo solar local, la órbita se adapta a los movimientos de traslación y rotación de la Tierra, lo que hace que se facilite la interpretación de imágenes, ya que la iluminación es muy similar en cada pase. El ángulo entre el plano orbital y la dirección en la que se mueve la Tierra es constante, generalmente se tratan de órbitas polares. Algunos ejemplos de satélites en órbitas heliosíncronas son los Landsat, la segunda serie de los Sentinel y el satélite de la NASA Aqua.

### 3.3.3 Cálculos de los elementos orbitales

De las 3 generaciones de satélites NOAA que se han lanzado hasta el momento, solo la primera ha tenido una altura mayor a los 1000 km, en concreto en torno a los 1400 km. La cuarta y quinta generación han orbitado y orbitan en torno a los 800 km de altura.

Nos centraremos en los 3 satélites aun en funcionamiento, los NOAA 15, NOAA 18 y NOAA 19.

Para ello se desarrollarán los cálculos para el satélite NOAA 15 y para los NOAA 18 y NOAA 19 se indicarán los datos de las órbitas y finalmente se agruparán los resultados en una tabla.

El satélite NOAA 15 traza una órbita heliosíncrona, con una elipse que tiene un semieje mayor de 7.184,62 km con una excentricidad de 0,001007. [15]

Primero calcularemos el eje menor de la elipse, para ello utilizaremos la siguiente fórmula:

$$e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a} \quad (2.1)$$

Donde “e” es la excentricidad, “a” es el eje mayor y “b” el eje menor. Desarrollando la ecuación (2.1) para despejar el eje menor obtenemos:

$$b = \sqrt{a^2 - (ae)^2} \quad (2.2)$$

Obteniendo un eje menor de 7.184,616 km, es una órbita prácticamente circular.

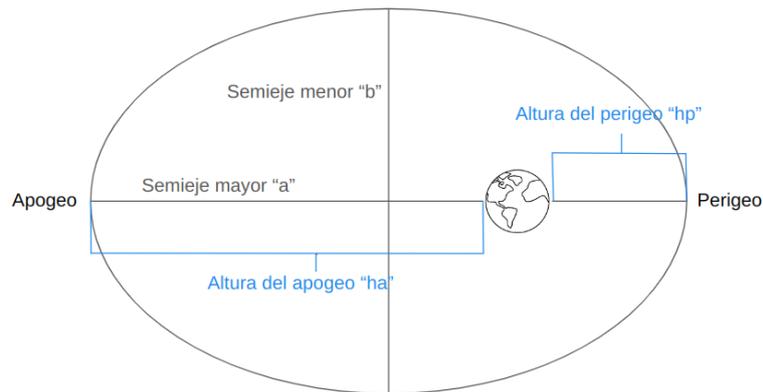
A partir de los datos obtenidos anteriormente, podemos calcular la distancia desde la superficie de la Tierra hasta el perigeo y hasta el apogeo:

$$hp = a(1 - e) - Rt = 807,385 \text{ km} \quad (2.3)$$

$$ha = a(1 + e) - Rt = 821,855 \text{ km} \quad (2.4)$$

Siendo  $R_t$  el radio de la Tierra, 6.370 km. Observando los resultados obtenidos, podemos decir que las órbitas que siguen los satélites NOAA son prácticamente circulares, por lo que aproximaremos las órbitas elípticas a órbitas circulares, utilizaremos como altura del satélite el promedio de las alturas calculadas anteriormente, es decir 814,62 km.

En la Figura 24 vemos los parámetros de una órbita con la forma de una elipse y la Tierra en uno de sus focos.



**Figura 24. Elementos de una elipse.**

Teniendo todos los parámetros de la elipse calculados, podemos calcular la velocidad del satélite en el apogeo y en el perigeo. Para ello haremos uso de la integral Vis-Viva:

$$\frac{v^2}{2} - \frac{GM}{R} = -\frac{1}{2} \frac{GM}{a} \quad (2.5)$$

Donde la “v” es la velocidad en metros por segundo, es decir, el valor que queremos calcular.

La “R” es el promedio de la distancia entre la superficie de la Tierra y el satélite en metros, los valores calculados en las ecuaciones (2.3) y (2.4), sumándole el radio de la Tierra, 6.370 km.

Y “GM” es una constante “μ” de valor  $\mu = 3,986 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$ , compuesta por la constante de gravitación universal “G” y la masa de la Tierra “M”.

Despejando la velocidad de la ecuación (2.5) obtenemos:

$$v = \sqrt{\frac{\mu}{R}} \quad (2.6)$$

Y sustituyendo la “R” por el promedio calculado anteriormente más el radio de la Tierra se obtiene:

$$v = \sqrt{\frac{3.986 \times 10^{14}}{814.62 + 6.370.000}} = 7.448,46 \text{ m/s} \quad (2.7)$$

Y por último calculamos el periodo del satélite, es decir, cuanto tiempo tarda en dar una vuelta a la Tierra. Para ello haremos uso de la tercera ley de Kepler:

$$a^3 = \frac{\mu \times T^2}{4\pi^2} \quad (2.8)$$

Siendo “T” el periodo a calcular. Por lo que despejándolo obtenemos:

$$T = \sqrt{\frac{a^3 \times 4\pi^2}{\mu}} = 6.060,62 \text{ segundos} \quad (2.9)$$

Si pasamos 6060,62 segundos a minutos obtenemos un periodo de 101,01 minutos.

Para el satélite NOAA 18, tenemos una distancia del semieje mayor de 7.230,03 km con una excentricidad de 0,0014261.

Y para el satélite NOAA 19 la distancia del semieje mayor es de 7.230,91 km y una excentricidad de 0,0013582.

Con todos los datos anteriores, y siguiendo los cálculos realizados para el NOAA 15 obtenemos la siguiente tabla de valores:

Satélite	Altura Perigeo (km)	hp	Altura Apogeo (km)	ha	Velocidad órbita circular (m/s)	Periodo (minutos)	Inclinación (grados)
NOAA 15	807,385		821,854		7.448,46	101,01	98,8
NOAA 18	849,689		870,031		7.425,124	101,96	99,17
NOAA 19	851,088		870,731		7.424,589	101,988	98,97

**Tabla 1. Valores elementos órbitas.**

De esta forma se puede observar que los 3 satélites se sitúan a alturas muy similares, siendo el más antiguo de todos el que se sitúa a una menor altura. Además, también el satélite con un periodo menor y una mayor velocidad en el punto más rápido de su órbita, que es el perigeo.

### 3.3.4 Cálculos tiempo de visibilidad

Tras obtener todos los valores para describir como son las órbitas de los satélites, calcularemos el tiempo de visibilidad durante el cual podremos recibir la señal de los satélites NOAA.

Para ello lo primero para tener en cuenta es la antena que se va a utilizar a la hora de realizar el experimento. Como se comentará más en detalle en Capítulos siguientes, la antena está equipada con un rotor que conectado a un software, realiza el seguimiento del satélite siempre apuntando el máximo del diagrama de radiación de la antena al satélite. Para no forzar el rotor de la antena, la elevación mínima de la antena será de 10°. Gracias a su diagrama de radiación recibirá la señal del satélite a partir de los 6° de elevación de forma aproximada. Es decir, el ángulo de elevación mínimo será  $\epsilon = 6^\circ$  o  $\epsilon = 0.104$  rad. La antena está situada a 28 metros sobre el suelo, y como comparando con las unidades de la altura del satélite (metros frente a kilómetros), supondremos que la antena se encuentra a ras de suelo.

Nos vamos a centrar primero en el satélite NOAA 15, el cual se encuentra de media a una altura de 815 km de altura sobre la superficie de la Tierra. Y con todos estos datos, y sabiendo que el radio de la Tierra tiene un valor de 6370 km, podemos dibujar el esquema de la Figura 25:

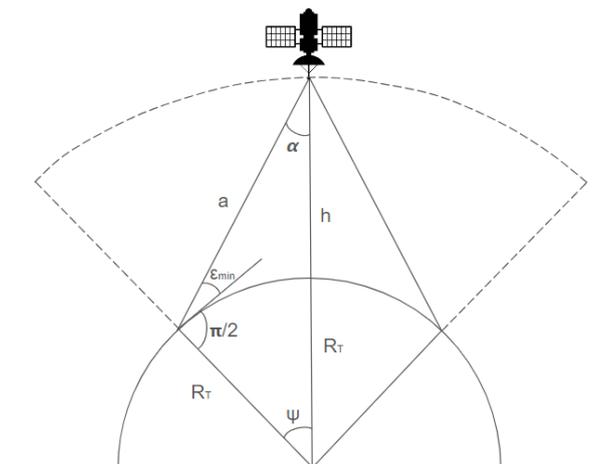


Figura 25. Esquema de la órbita sobre estación base.

Para calcular el tiempo de visibilidad del satélite sobre la estación base en el mejor de los casos, es decir, cuando pasa a  $90^\circ$  de elevación, primero deberemos calcular el ángulo interno  $\Psi$ , que es el ángulo que forman el Nadir del satélite con el máximo punto de visibilidad.

La fórmula necesaria para este cálculo es la ley del seno de geometría plana:

$$\frac{\text{sen}(\theta)}{a} = \frac{\text{sen}(\beta)}{b} = \frac{\text{sen}(\gamma)}{c} \quad (2.10)$$

Relacionando " $\theta$ " con el ángulo " $\varepsilon$ " más un ángulo recto  $\pi/2$  y " $a$ " con la suma de la altura del satélite con el radio de la Tierra. También relacionamos el ángulo de visión del satélite " $\alpha$ " con " $\beta$ " y " $b$ " con el radio de la Tierra.

De tal forma que sustituyendo en la ecuación (2.10) nos queda lo siguiente:

$$\frac{\text{sen}(\varepsilon + \pi/2)}{h + R_T} = \frac{\text{sen}(\alpha)}{R_T} \quad (2.11)$$

$$\frac{\text{sen}(0,104 + \pi/2)}{815 + 6.370} = \frac{\text{sen}(\alpha)}{6.370} \quad (2.12)$$

Y despejando " $\alpha$ " de la ecuación (2.12) obtenemos:

$$\alpha = \arcsen\left(\frac{\text{sen}\left(0,104 + \frac{\pi}{2}\right)}{815 + 6.370} \times 6.370\right) = 1,0796 \text{ rad} \quad (2.13)$$

Tras obtener el ángulo " $\alpha$ " y aplicando la propiedad de los triángulos en la que todos los ángulos deben sumar  $180^\circ$ , o  $\pi$  radianes, obtenemos el ángulo interno  $\Psi$ :

$$\pi = \alpha + \Psi + \left(\varepsilon + \frac{\pi}{2}\right) \quad (2.14)$$

$$\Psi = \pi - \alpha - \left(\varepsilon + \frac{\pi}{2}\right) = 0,387 \text{ rad} \quad (2.14)$$

Que pasándolo a grados es  $\Psi = 22,18^\circ$ .

Con el ángulo interno calculado obtenemos cual es el arco de visibilidad del satélite en radianes desde el Nadir,  $2\Psi = 0,774 \text{ rad}$ .

Y calculamos a continuación la distancia que recorre el satélite “d”, para ello multiplicamos el arco en radianes por la distancia total desde el centro de la Tierra hasta el satélite:

$$d = 2\Psi \times (815 + 6.370) = 5.561,19 \text{ km} \quad (2.15)$$

Y la velocidad media del satélite en la órbita es de 7.448 m/s, y sabiendo que velocidad es igual a distancia dividido tiempo obtenemos:

$$t = \frac{d}{v} = \frac{5.561,19 \times 10^3 (m)}{7.448 \left(\frac{m}{s}\right)} = 747 \text{ segundos} \quad (2.16)$$

Y en minutos 12 minutos y 27 segundos.

Los cálculos realizados para los NOAA 18 y NOAA 19 se desglosan en la siguiente tabla:

Satélite	Altura media (km)	Ángulo interno $\Psi$ (radianes)	Distancia recorrida (km)	Velocidad (m/s)	Tiempo de visibilidad (segundos)	Tiempo de visibilidad (minutos y segundos)
NOAA 15	815	0,387	5.561,19	7.448	747	12m 27s
NOAA 18	859,86	0,39865	5.764,367	7.425	776,34	12m 56s
NOAA 19	860,9	0,3989	5.768,812	7.424,585	776,988	12m 57s

**Tabla 2. Cálculo tiempos de visibilidad.**

Observamos que los NOAA 18 y NOAA 19, al situarse a una altura muy similar y tener unas velocidades medias también muy similares, tienen tiempos de visibilidad que distan 1 segundo, por lo que no encontraremos diferencia entre el pase de uno o de otro salvo la frecuencia a la que transmiten.

Utilizando el programa Orbitron, hemos calculado los pases de los satélites a partir de una elevación de  $6^\circ$ , dando por válidos nuestros cálculos cuando la elevación máxima del pase supera los  $20^\circ$ , durando 11 minutos en el caso de unos  $20^\circ$  de elevación y llegando a los 13 con más elevación.

2024-05-14 22:47:55 NOAA 18	117.7	6.1
2024-05-14 22:53:04 NOAA 18	63.3	21.3
2024-05-14 22:58:13 NOAA 18	9.1	6.0

**Figura 26. Pase del NOAA 18 calculado con Orbitron.**



Como podemos observar en la Figura 26, la elevación máxima del satélite en el pase es de 21, 3°, y si indicamos que queremos que se empiece a detectar el satélite a partir de los 6° de elevación, el pase durará un poco menos de 11 minutos. En cambio, como veremos en la Figura 27:

2024-05-15 00:27:02 NOAA 18	181.1	6.1
2024-05-15 00:33:17 NOAA 18	259.4	52.2
2024-05-15 00:39:34 NOAA 18	338.5	6.0

**Figura 27. Pase del NOAA 18 calculado con Orbitron.**

Ya con una elevación máxima de 52, 2° el tiempo de visibilidad del satélite es de 12 minutos y 30 segundos. Siendo este tiempo aproximado el tiempo que tendremos para recibir la señal de los satélites NOAA durante el desarrollo del experimento.

## Capítulo 4. Software utilizado

### 4.1 GNU Radio Companion

Se trata de un software de desarrollo de código abierto que ofrece bloques de procesamiento de señal para la implementación de SDR. Puede ser utilizado tanto en proyectos con un hardware de recepción de radio frecuencias de relativamente bajo coste, o incluso utilizarlo sin un hardware adicional y desarrollar de esta forma un entorno de simulación solo con el software. Se puede utilizar tanto en Windows, Linux y macOS y puede llevar a cabo todo tipo de procesamiento de señal. Se puede utilizar para el diseño de aplicaciones para la recepción o el envío de información. Para el envío de información sí que es necesario contar con un SDR y, dependiendo del proyecto, con un hardware adicional como puede ser una antena.

Para el procesamiento de señal se trabaja mediante bloques, uniéndolos utilizando sus entradas y salidas. Algunos de los bloques de elementos de procesamiento de señal que se pueden utilizar son: filtros (FIR, IIR, ...), diezmadores, interpoladores, elementos de sincronización, ecualizadores, demoduladores, decodificadores y una larga lista de elementos. Los elementos utilizados se indicarán en siguientes capítulos cuando se describa el esquema realizado.

El entorno de trabajo de GNU Radio es el siguiente:

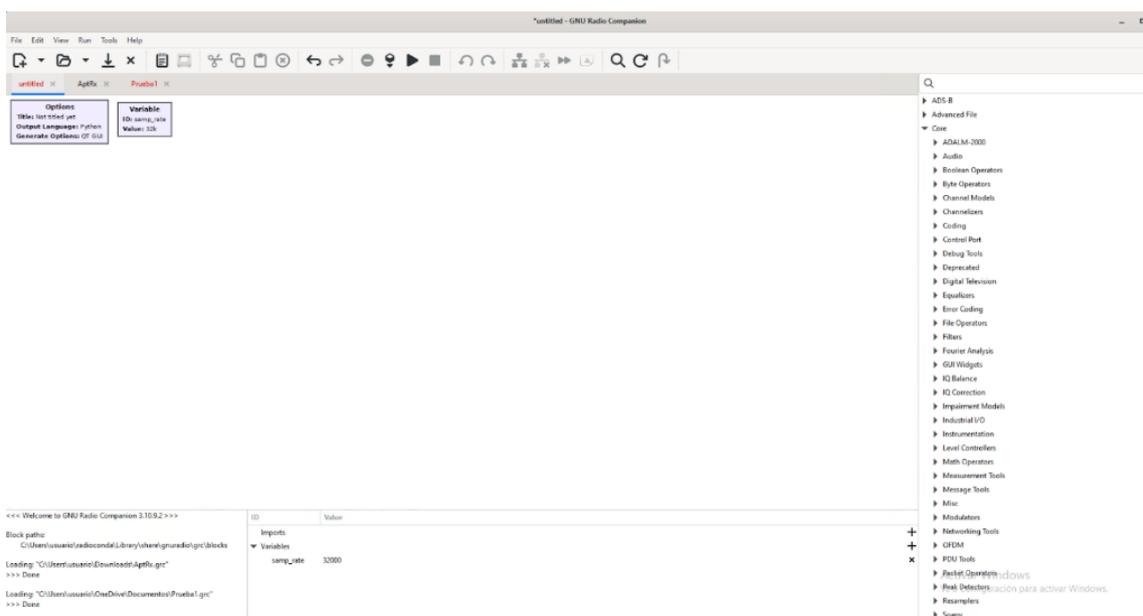


Figura 28. Entorno de trabajo GNU Radio.

Lo primero a tener en cuenta son los dos bloques por defecto que se crean al realizar un proyecto nuevo: Options y Value. El bloque Options es único, y en él se indica el nombre del proyecto, el lenguaje de programación, puede ser Python o C++, y la interfaz gráfica que se utiliza para la visualización de las gráficas disponibles. En anteriores versiones del software había otro tipo de interfaz gráfica llamada WX GUI, pero en Windows se quedó obsoleta y se decidió eliminar en las versiones posteriores.

El bloque variable no es único, pueden utilizarse los que quieran a lo largo de un proyecto, ya que nos da la facilidad de poder asignar en diferentes bloques el procesamiento de una misma frecuencia, ganancia o cualquier tipo de variable que se repita en varias ocasiones y si se cambia en un bloque se tiene que cambiar en muchos, funciona como una variable en cualquier lenguaje de programación. En la Figura 28 se puede observar que el bloque variable tiene definido el

nombre `samp_rate` con un valor de 32k, por lo que si se insertara el nombre de la variable en un bloque Throttle, que se encarga de la limitación y control de la tasa de muestras, se tendría un bloque que limita la tasa de muestreo a 32 kSPS.

Dentro de cada uno de los bloques que tenemos disponibles, se pueden editar todos los parámetros que lo componen, pudiendo hacer así un procesamiento de señal todo lo específico que se necesite. También existe la posibilidad de visualizar la documentación completa del bloque, ya que en la última pestaña de cada bloque tenemos un link que nos llevará a la página de GNU Radio en la que se nos muestra la documentación.

Para poder ver el código del flowgraph, ver el código descrito en Python o C++, se pulsa F5 y se genera el código correspondiente al conjunto de bloques diseñado. Es un código capaz de abrirse en cualquier editor de código como VSCode. Otra herramienta muy útil que tiene el programa es un diseñador de filtros digitales, muy parecida a la herramienta que tenemos en Matlab.

Por último, a la derecha de la Figura 28, encontramos un menú desplegable donde se buscan los bloques que necesitamos para el proyecto, para utilizarlos se hace doble click sobre el bloque que se quiera utilizar y se añadirá al entorno de trabajo y ya podremos maniobrar con él.

GNU Radio se ha utilizado en el proyecto para el diseño del software del SDR para poder captar las señales APT de los satélites NOAA y guardar el audio recibido en un archivo de audio WAV para su posterior decodificación.

## 4.2 Matlab

Matlab es una plataforma de programación y cálculo numérico utilizada por ingenieros y científicos para el análisis de datos, desarrollo de algoritmos, creación de modelos, y en el caso de este proyecto, para el procesamiento de señales.

Existen gran cantidad de toolboxes que ayudan a realizar cada una de las tareas que uno se proponga, ya sea el Toolbox de Machine Learning, Deep Learning, Análisis de Texto, etc. También tenemos la opción de crear aplicaciones. Estas aplicaciones pueden facilitar el comprender conceptos difíciles de visualizar, como puede ser una app para observar diagramas de radiación de dipolos, bocinas, reflectores, etc.

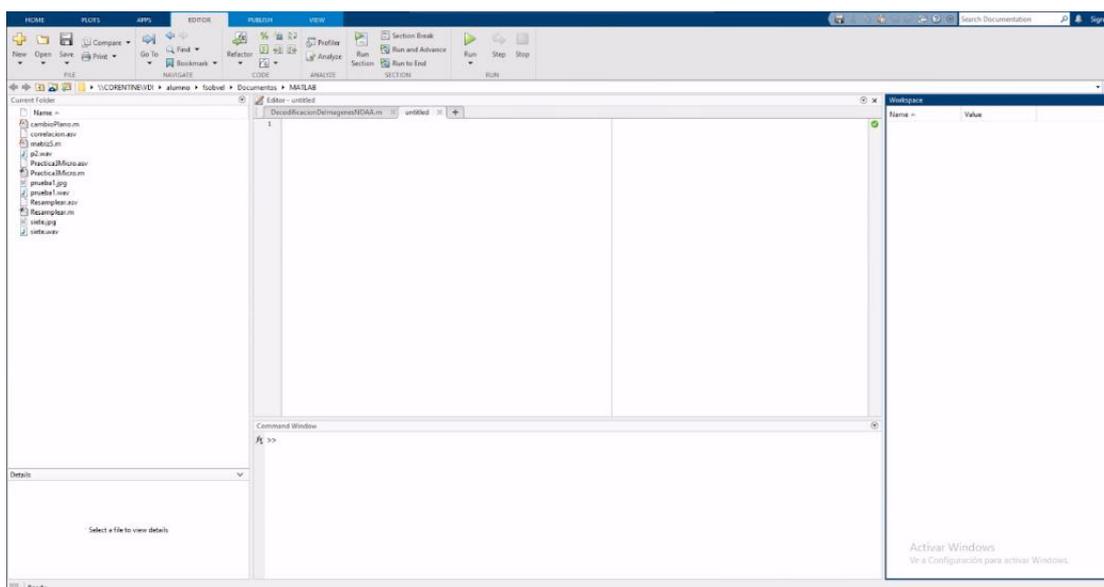


Figura 29. Entorno de trabajo Matlab.

Durante la carrera, y más en concreto en la rama de sistemas de telecomunicación, nos hemos ido familiarizando con muchas de las opciones que nos ofrece Matlab y su entorno de trabajo. Empezando de izquierda a derecha, tenemos la carpeta actual donde estamos trabajando, es la carpeta donde se encuentran los scripts que vamos a ejecutar o los archivos que utilizará el script para funcionar correctamente, si queremos hacer uso de algún tipo de archivo externo, debemos indicar la ruta en la que se encuentra.

Observando la Figura 29, en el centro del entorno de trabajo tenemos el editor de scripts y la ventana de comandos. En el editor de scripts es donde se escriben los scripts que se quieren ejecutar, mientras que en la ventana de comandos es donde se compilan y ejecutan de forma secuencial las líneas de los scripts y donde veremos los resultados tras la ejecución. A la hora de ejecutar los scripts en el editor, existen diversas opciones: con Run compilamos y ejecutamos todo el script, y solo se detiene cuando encuentra algún error o se termina el código. Seleccionando parte del código y con el botón derecho pulsando Evaluate Selection in Command Window, por lo que se puede ir probando poco a poco el código realizado. Separando en secciones utilizando los símbolos “%%”, de esta manera se puede separar el código en diferentes pasos y con Run Section sólo se ejecuta el paso seleccionado.

Por último, el Workspace, donde se guardan las variables que se ejecutan en el código. Se indica el tipo de variable y si son simples se muestra su valor, si son vectores o matrices indica el tamaño nxm.

En la barra de herramientas se observan varias pestañas, donde las más importantes son: HOME, donde se pueden crear nuevos scripts, abrir antiguos, importar archivos, buscar Add-Ons, el manual de ayudas, etc. PLOTS: una manera más fácil de mostrar en una gráfica las variables que se quiera. APPS: donde se puede desde crear nuevas Apps hasta descargar ya existentes. EDITOR: se tiene todo lo comentado anteriormente para la ejecución y compilación de los scripts.

En este proyecto, se ha utilizado Matlab para procesar la señal del audio WAV recibido de GNU Radio, y este audio poder decodificarlo y mostrar la imagen captada por el satélite NOAA que se reciba.

### 4.3 ¿Por qué GNU Radio y Matlab?

La opción fácil para este proyecto habría sido utilizar los programas ya existentes que realizan todo el proceso que se describirá en los próximos capítulos de la memoria. Para estos programas solo se necesita un hardware y automáticamente recibe la señal APT de los NOAA y decodifica la imagen recibida.

Estos programas que acelerarían el proceso son los siguientes: para la recepción de la señal Airspy SDR y para la decodificación de la imagen WXtoImg o el repositorio de GitHub noaa-apt, por lo que el uso de estos ha sido a modo de prueba.

#### 4.3.1 Airspy SDR

Se trata de un software cross-platform de código abierto utilizado para facilitar el uso de los SDR. Se puede instalar en Windows, Linux y macOS.

Para utilizar correctamente el programa se debe conectar el SDR a una antena y al ordenador, y al activar el programa aparecerá el espectrograma centrado en la frecuencia indicada. Podemos seleccionar el ancho de banda que queremos recibir, el tipo de ventana, las muestras por segundo y el tipo de banda a escuchar.

Como ejemplo, para poder escuchar una radio comercial FM, tan solo debemos seleccionar el tipo de dispositivo SDR que se está utilizando y la frecuencia de la radio que queremos escuchar. Tras esto ya tendremos una radio FM funcional. Al contrario que en GNU Radio, donde se deberán

interconectar los bloques necesarios como el bloque SDR, filtros, demoduladores FM y un bloque que emita lo que se reciba indicando la frecuencia de muestreo de este.

El entorno de trabajo del Airspy SDR es el mostrado en la Figura 30:

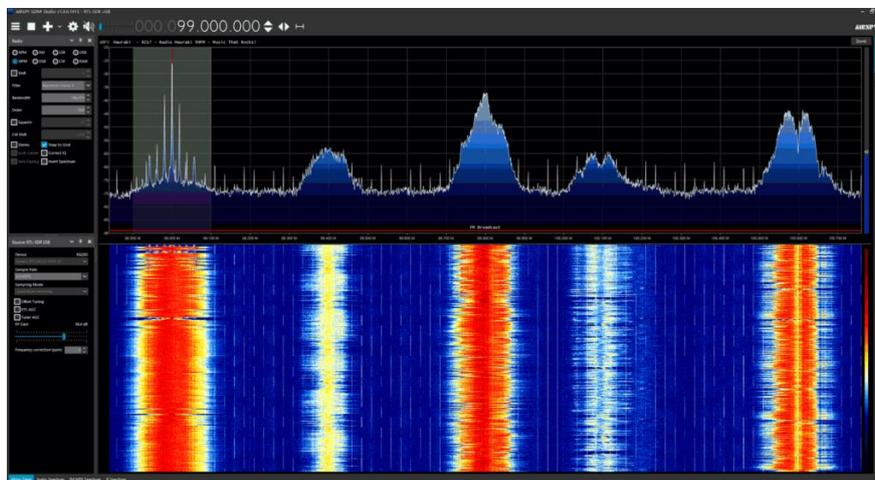


Figura 30. Airspy SDR.

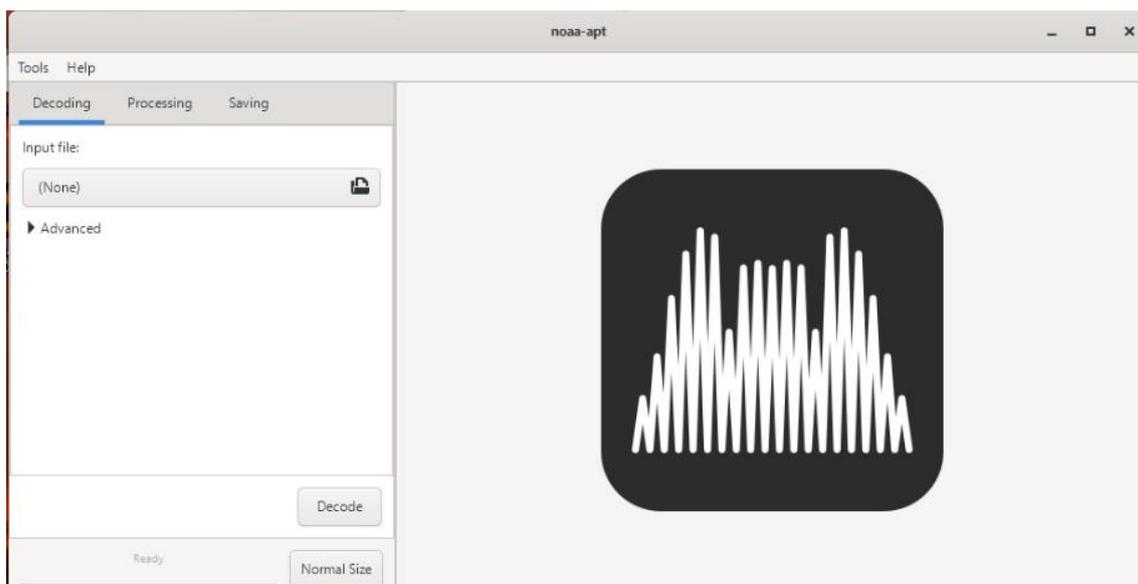
#### 4.3.2 *WXtoImg* y *noaa-apt*

En ambos casos se trata de software para la decodificación de imágenes transmitidas en formato APT y convertidas a un audio WAV.

WXtoImg es un programa de decodificación totalmente automático de señales APT de satélites NOAA. Con él se puede grabar, editar, decodificar y visualizar las imágenes tanto en Linux, Windows y macOS. Juntando WXtoImg con Airspy mediante un cable de audio virtual, se puede ver en tiempo real la recepción y decodificación de la imagen línea por línea. Es un programa sencillo de utilizar, pero no tan fácil de instalar y configurar debido a las características que se deben modificar para la correcta decodificación de las imágenes. [16]

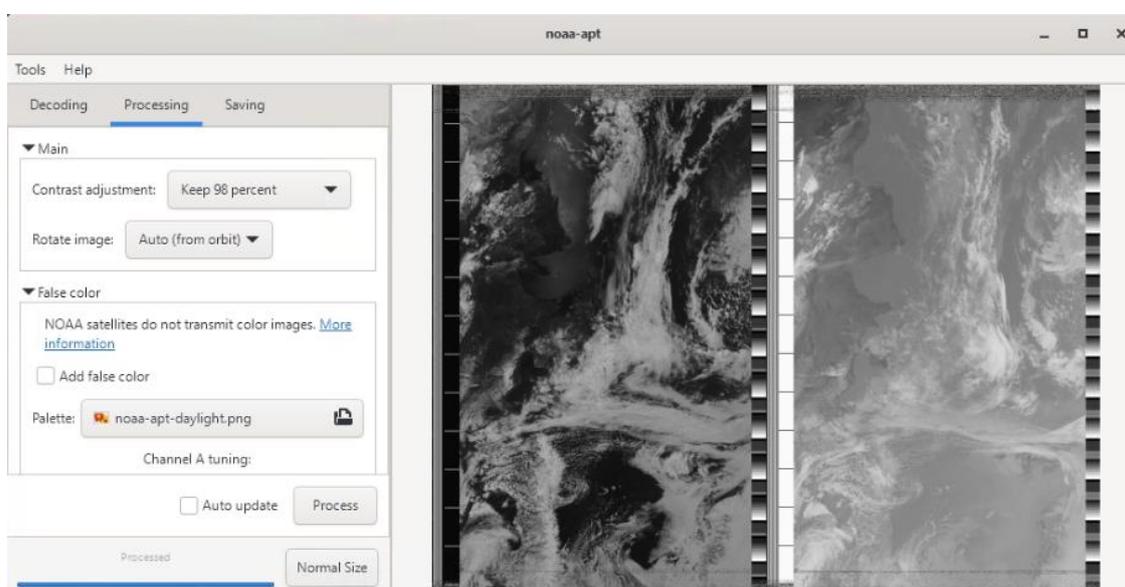
El repositorio de GitHub *noaa-apt*, en cambio, es mucho más sencillo de utilizar, no es capaz de realizar todas las acciones que si puede el WXtoImg, pero es un programa que se enfoca de forma específica en las funciones para las que ha sido diseñado, decodificar una imagen de un audio. Se trata del software que se ha utilizado en el proyecto para comprobar el correcto funcionamiento del código descrito en Matlab. [17]

es un programa que se enfoca específicamente en las funciones para las que ha sido diseñado.



**Figura 31. Inicio noaa-apt.**

En la Figura 31 observamos la página de inicio de noaa-apt. En este software debemos seleccionar en Input File el audio recibido de los satélites NOAA y pulsar en Decode, tras completarse la decodificación, debemos ir a la pestaña de Processing.



**Figura 32. Processing noaa-apt.**

Si pulsamos sobre el botón Process que se ve en la Figura 32, se mostrará la imagen decodificada que queremos. Tenemos la opción de guardar la imagen en el formato que queramos en la pestaña Saving.

Para el proyecto se ha decidido empezar lo más abajo posible en la creación de un software que decodifica la señal APT, en este caso el archivo .WAV, describiendo todo el proceso desde cero como se verá más adelante en el documento.

## Capítulo 5. Primeras versiones de los programas desarrollados

### 5.1 Esquema GNU Radio Companion [18]

Como ya se ha comentado anteriormente, para poder visualizar la imagen que hemos recibido de la señal APT del satélite NOAA se necesita en un primer paso obtener el audio con el cual se decodificará la imagen posteriormente. Para la obtención del audio y guardarlo en un archivo de audio se utilizará el software comentado anteriormente: GNU Radio Companion.

En este apartado se presentará el esquema inicial utilizado en GNU Radio para la recepción de la señal, esquema que durante el desarrollo del experimento en la estación base de la ETSIT sufrirá cambios para adaptarse a al hardware utilizado y solucionar los problemas que irán apareciendo durante el desarrollo del experimento.

Antes de empezar con el desarrollo, es importante recalcar cuáles son los requisitos necesarios para el correcto funcionamiento del esquema. Estos requisitos se basan en lo documentado anteriormente sobre los satélites NOAA, es decir, las frecuencias de transmisión, una diferente para cada uno de los satélites, la frecuencia de muestreo que debe tener el audio final, 11025 Hz, es necesaria una demodulación FM, un filtrado con un ancho de banda de 40 kHz y una compensación del efecto Doppler. Tras tener claras los requisitos que debe tener la cadena de recepción, podemos empezar a diseñarla.

El esquema inicial, que está sujeto a cambios durante el desarrollo del experimento, es el mostrado en la Figura 33.

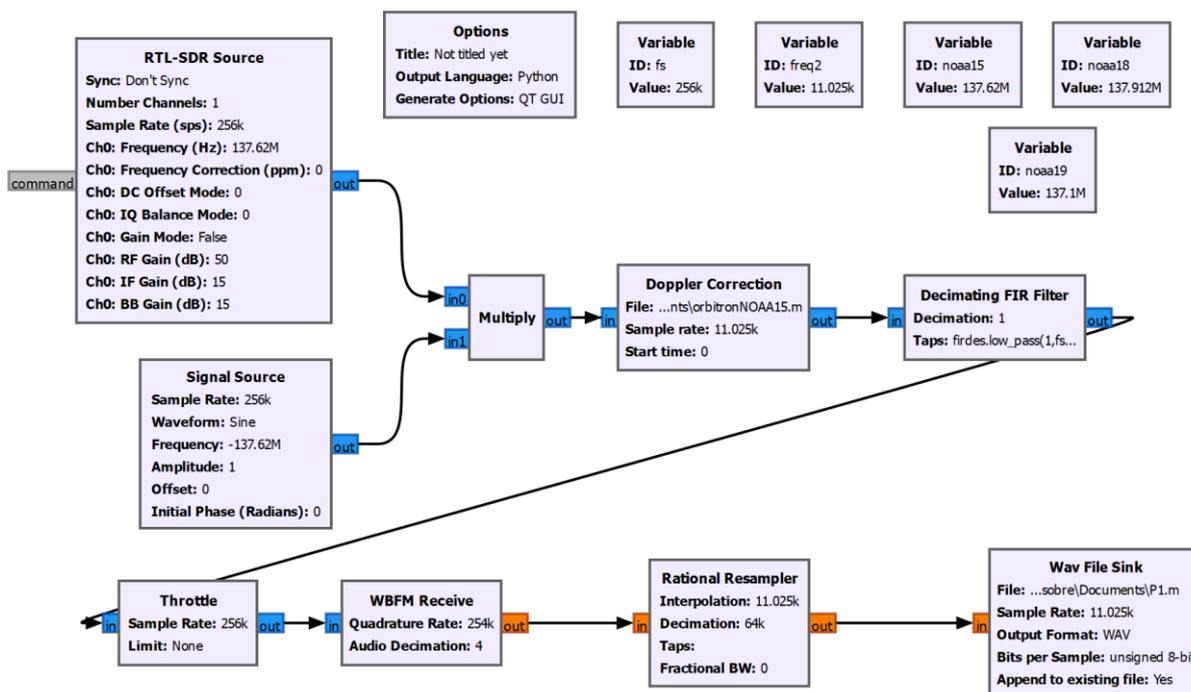


Figura 33. Esquema inicial GNU Radio.

**Bloque de configuración y variables:**

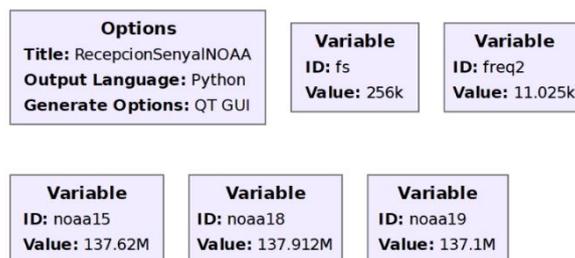


Figura 34. Opciones y variables.

En la Figura 34 observamos 2 tipos de bloques, Options y Variable. Para empezar con el proyecto, en el bloque Options, se debe iniciar indicando el nombre que se le quiere dar, el lenguaje de programación y el tipo de interfaz gráfica a utilizar. En este caso el proyecto se llamará recepciónSenyalNOAA, se escribirá en Python y la interfaz gráfica será la predefinida QT GUI.

Las variables que se utilizaran en el proyecto son 5:

- fs: indica la frecuencia de muestreo inicial de la señal, 256 kHz. Se seleccionó un valor alto para evitar la interferencia entre símbolos, que según el teorema de Nyquist debe ser 2 veces mayor que el ancho de banda de la señal. Esta variable se encuentra en todos los bloques hasta el Resampler.
- freq2: Valor de 11025 Hz, es la frecuencia a la que se debe decodificar la imagen en el siguiente paso del proyecto, Matlab. Podemos ver que esta variable está en el valor de la Interpolación del bloque Resampler y en la frecuencia de muestreo del audio.
- noaa 15: Con un valor de 137.62 MHz. Se trata de la frecuencia a la que trabaja el satélite NOAA 15.
- noaa 18: Al igual que con la anterior variable, 137.912 MHz es la frecuencia a la que trabaja el NOAA 18.
- noaa 19: Y por último el NOAA 19, cuya frecuencia de trabajo es 137.1 MHz.

Las 3 últimas se encuentran en el bloque SDR-RTL Source. Se utilizan para una mayor facilidad de cambio para variar en la recepción de cualquiera de los 3 satélites NOAA.

### Bloques RTL-SDR Source:

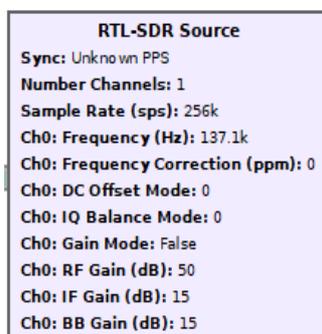


Figura 35. Bloque RTL-SDR Source.

En el bloque de la Figura 35 encontramos los parámetros que se le introducen al SDR utilizado. Se indica que solo exista un canal, ya que el audio debe ser mono, la frecuencia de muestreo, la

frecuencia a la que se tiene que recibir cada uno de los satélites, y valores de ganancia para RF, FI y BB.

### Bloque Signal Source, Multiply y Decimating FIR Filter:

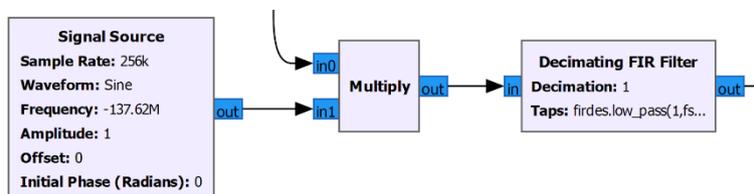


Figura 36. Bloques Signal Source, Multiply y Filtro.

En la Figura 36 tenemos los bloques Signal Source, Multiply y Decimating FIR Filter. El primer paso al recibir la señal será centrar la señal recibida a 0Hz y a continuación pasarla por un filtro FIR paso bajo.

Con el bloque Signal Source nos encargamos de crear una señal sinusoidal, con frecuencia de muestreo de 256 kHz y centrada en la misma frecuencia que el satélite NOAA que vamos a recibir pero cambiándole el signo. Esta señal la utilizamos para multiplicarla por la señal recibida con el SDR utilizando el bloque Multiply. De esta forma tenemos la señal recibida del SDR centrada a 0 Hz y simplifica el diseño del filtro paso bajo. Esta serie de bloques hace el trabajo de un oscilador local, bloque que no tenemos en GNU Radio.

A continuación, pasamos la señal resultante de la multiplicación por el bloque Decimating FIR Filter, donde la señal pasa por un filtro paso bajo que se indica con la instrucción: **firdec\_low\_pass(1, fs, 20000, 5000)**, y no se diezma, aunque tengamos la opción. El filtro paso bajo creado tiene ganancia 1, la frecuencia de muestreo sigue siendo 256 kHz, la banda de paso es de 20 kHz y la banda de transición de 5 kHz.

El procesamiento de la señal que pasa por los bloques anteriores es el siguiente:

1. Señal recibida centrada en la frecuencia de trabajo del NOAA 15, 137,61 MHz, y con un ancho de banda de 34 kHz.

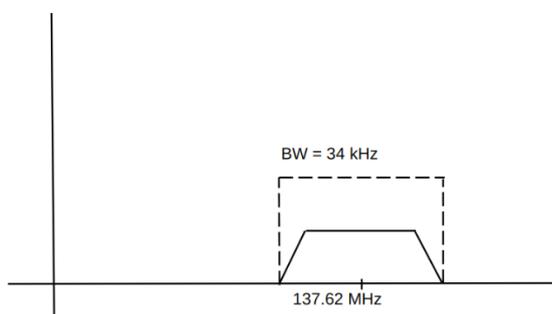


Figura 37. Señal recibida centrada en 137.2 MHz y ancho de banda de 34 kHz.

2. Multiplicación de la señal de la Figura 37 con una señal sinusoidal a -137.2 MHz.

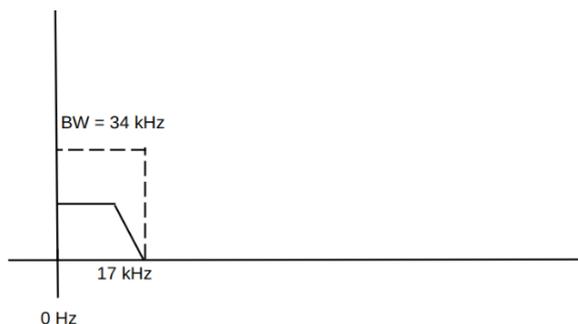


Figura 38. Señal centrada en 0 Hz.

- Tras centrar la señal, en la Figura 38, la pasamos por un filtro FIR paso bajo con frecuencia de corte de 20 kHz (pasa toda la señal original ya que es de 17 kHz) y un ancho de banda de transición de 5 kHz, como se observa en la Figura 39.

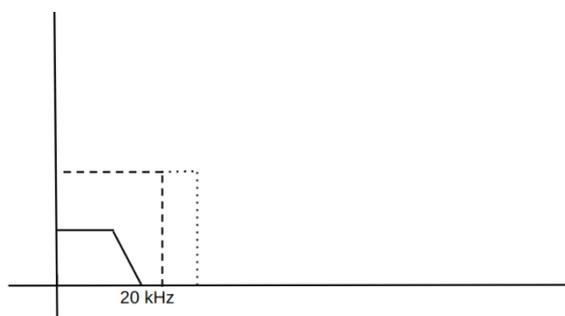


Figura 39. Señal resultante.

### Bloque Throttle:



Figura 40. Bloque Throttle.

El bloque de la Figura 40, sólo será necesario si el SDR utilizado no tiene la capacidad de limitar la tasa, que suelen ser la mayoría de los SDR los que no tienen esta capacidad, ya que este bloque se encarga de limitar el flujo de muestras para que la tasa media no supere la tasa específica en muestras por segundo. Copia lo que encuentra en su entrada hacia su salida, y si es necesario consume parte de las muestras que entran para conseguir a la salida la tasa media requerida, de cualquier forma, no cambia nunca la señal digital que encuentra a su entrada.

En el caso de este proyecto la señal que se quiere a la salida debe tener una tasa de 256kHz, así como la frecuencia de muestreo. El bloque se ha añadido para que no existan posibles problemas con la tasa, ya que en un principio no debería cambiar nada tener el bloque Throttle en el flowgraph.

### Bloque WBFM Receiver:



Figura 41. Bloque WBFM Receive.

El bloque de la Figura 41 es el corazón del esquema. Bloque jerárquico para la demodulación de una señal FM. La entrada se procesa para convertirla en una señal en banda base, y la salida es un audio demodulado.

Quadrature Rate es la tasa de muestreo en Fase y Cuadratura, y determina la resolución en frecuencia disponible para la demodulación y más adelante la decodificación de la señal FM.

Se ha decidido seguir con la misma frecuencia de muestreo que anteriormente, además de reducir la tasa de muestreo en un factor 4 diezmando la señal, reduciendo la tasa de muestreo, de esta forma se va a adaptar a la frecuencia de muestreo que requiere el audio final para ser decodificado y poder mostrar la imagen.

### Bloque Rational Resampler:



Figura 42. Bloque Rational Resampler.

El bloque de la Figura 42, es el que provoca que toda la programación en GNU Radio sea Python, ya que es el único lenguaje que soporta.

A la salida del demodulador se tenía que la tasa resultante de diezmar la señal en un factor 4 es de  $256 \div 4 = 64$ . Por lo que a la entrada de este bloque tendremos los 64 kHz, y el audio que se tiene que decodificar tiene una tasa de muestreo de 11.025 kHz.

El bloque pasa de recibir una señal con una frecuencia de muestreo de 64 kHz a que la señal resultante tenga una frecuencia de muestreo de 11.025 Hz, por lo que se empieza a utilizar a partir de ahora la variable `freq2` para los bloques restantes del diagrama.

### Bloque Doppler Correction:

Este bloque se incluye tras centrar la señal y antes del filtro paso bajo, se utiliza para predecir, a partir de la frecuencia de transmisión y el archivo que se le indica en la ruta, el efecto Doppler

existente durante la recepción de la señal. El archivo, que se extrae del software Orbitron, contiene las frecuencias corregidas que compensan el efecto Doppler en la señal recibida.

### **Bloques WAV File Sink y Audio Sink:**

Ambos bloques están relacionados con la señal de audio demodulada durante todo el proceso y que se necesita decodificar para mostrar la imagen del satélite por pantalla. El bloque Wav File Sink se encarga de guardar el audio demodulado en la ruta indicada en File, a una frecuencia de muestreo de 11025 Hz y con el formato de audio .WAV. Por su parte, el bloque Audio Sink retransmite la señal conforme la va recibiendo, sin guardarlo en ningún tipo de archivo.

## **5.2 Script MatLab**

Tras la correcta recepción de la señal y obtener un archivo de audio con formato WAV, el siguiente paso es decodificar dicho audio para obtener la imagen transmitida por el satélite NOAA. Al decodificarse la imagen, se mostrará por pantalla y se dará la opción de guardarla como un archivo PNG. Para este proceso se ha utilizado MatLab y las ToolBoxes de tratamiento y análisis de señal descritas en el capítulo 3. El script completo utilizado se detallará en el Anexo 2 de la memoria.

Para empezar con el desarrollo del script, tal como se ha hecho en el esquema de GNU Radio, es necesario tener claros los requisitos necesarios para que la decodificación y la visualización de las imágenes sea correcta. El audio debe tener una frecuencia de muestreo de 11025, por lo que, si diseñamos un filtro digital, este debe tener la frecuencia de muestreo indicada. También es necesario comprender el formato de la trama, y saber que el tamaño de la imagen será de 5512 píxeles. Por último, gracias a la documentación anterior sobre el formato de la trama, sabemos que será necesaria una señal de sincronismo, que cumpla los requisitos que se muestran en anteriores capítulos.

### **Lectura de la señal recibida:**

El primer paso para obtener la imagen decodificada es obtener los parámetros que nos interesan del audio obtenido con GNU Radio, en este caso se trata de la señal del audio y la frecuencia de muestreo del audio, debe ser de 11025 Hz.

También indicamos mediante dos variables las frecuencias de la banda de paso del filtro que calcularemos en el siguiente paso.

### **Filtrado paso banda de la señal:**

El siguiente paso es diseñar un filtro FIR Paso Banda, para ello, en Matlab, tenemos la opción de diseñar el filtro con la función **designfilt**. A este filtro le indicaremos 5 entradas para diseñarlo:

- 'bandpassfir': con esta instrucción creamos un filtro FIR Paso Banda.
- 'FilterOrder': indica el orden del filtro a utilizar, en nuestro caso el orden del filtro será 100.
- 'CutoffFrequency': al ser un filtro Paso Banda, solo deja pasar una banda determinada de frecuencias, deberemos indicar con dos valores donde empieza y donde caba la banda de paso, en nuestro caso la frecuencia inferior de paso es 500 Hz y la superior 5000 Hz.
- 'SampleRate': por último indicamos la frecuencia de muestreo, que como lo será en todo el código es de 11025 Hz.

El siguiente paso es el cálculo de la envolvente de la señal. La envolvente representa las variaciones máximas y mínimas de la señal a lo largo del tiempo, de esta forma podemos detectar

los picos de la señal de audio y en los siguientes pasos se podrá obtener de manera más sencilla los picos que indican los inicios de línea de la imagen. Para realizar la envolvente de la señal, se aplicará a la señal anteriormente filtrada una transformada de Hilbert. Tras obtener la transformada, se normaliza el resultado con el máximo de transformada, esto para obtener valores en el rango de  $\{0,1\}$ .

$$\frac{|H\{x(t)\}|}{|H\{x(t)\}_{\max}|} \quad (2.17)$$

### Señal de sincronismo:

Para los siguientes pasos necesitaremos una señal de sincronismo que nos ayudará a encontrar los picos de la envolvente calculada anteriormente y de esta forma encontrar los principios de línea de la imagen a decodificar.

Como ya sabemos, las señales APT utilizan una señal de sincronismo al principio de cada línea de la imagen, y haciendo que la señal de sincronismo que vamos a crear coincida con los picos de la envolvente, obtendremos los principios de línea de la imagen. Para crear la señal de sincronismo ya sabemos que una trama de la señal APT tiene 128 líneas, y se procesa a una frecuencia de muestreo de 11025 Hz. Por lo que diseñamos un pulso cuadrado con un vector de tiempos que va desde 0 hasta  $1/128$  con saltos de  $1/11025$  segundos.

La señal de sincronismo se muestra en la Figura 43.

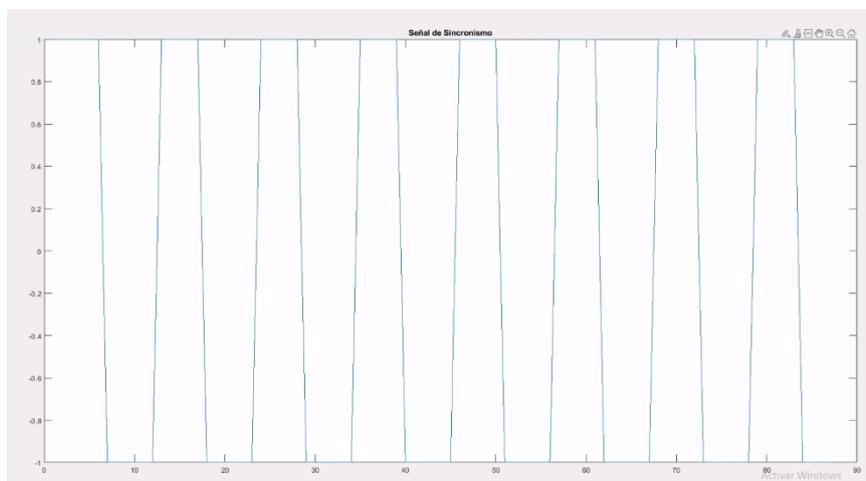


Figura 43. Señal de sincronismo.

### Primer pulso de la señal:

El siguiente paso es encontrar los inicios de línea de la señal, para ello se utilizará una función llamada `posición_inicial` que se detallará más adelante.

Lo primero es indicar la longitud de la imagen, que como sabemos del formato APT las líneas son de 5512 palabras, esto lo sabemos por la frecuencia de muestreo, ya que si una línea se muestrea cada  $1/11025$  segundos, cada uno de los canales tardará en muestrearse  $1/5512$  segundos, por lo que iniciamos una variable indicando el tamaño de las líneas. A continuación, indicamos una ventana de escaneo, se utilizará en la función que buscará las posiciones iniciales de las líneas. Como última variable indicamos un umbral a 0. El umbral se utilizará como valor mínimo para detectar los picos que indicaran los inicios de línea en la función que busca las posiciones iniciales, su valor es 0 ya que, si indicamos un valor más alto que el máximo de los

picos, el primer valor de un vector resultante, que se verá en la función, será negativo y obtendremos un error en el código.

Seguimos con la función principal del código: `posición_inicial`.

Es la función mediante la cual se encuentran los inicios de línea, se trata de un bucle el cual itera la señal entera en bloques, cuya longitud es el de una ventana de escaneo nombrada anteriormente, y tiene como entrada el valor del umbral, la señal envolvente y la señal de sincronización.

Para ello, en cada iteración realiza la correlación cruzada entre la parte de la señal envolvente que se encuentra entre los valores de la ventana de escaneo y la señal de sincronismo, **`xcorr(envolvente(ventana de escaneo), señal sincronismo)`**, y de esta correlación guarda dos vectores, uno con los valores de la correlación y otro con el desplazamiento de la correlación, es decir un vector que representa cuánto se desplaza la señal de la envolvente con respecto a la de sincronización durante el proceso de correlación. Y el valor máximo de dicha correlación se guarda en una variable, y en otra variable la posición en la que se encuentra dicho valor máximo de la correlación.

A continuación, se compara el valor máximo de la correlación, calculado anteriormente, con el umbral, que se indica como entrada a la función, si el valor máximo de la correlación es más alto que el del umbral, significa que es un inicio de línea, y seguirá el siguiente proceso: para la posición del valor máximo de la correlación, calculamos a que posición del vector de desplazamiento de la correlación pertenece, y se guarda en una variable. Este valor se itera dentro de un vector que contendrá las posiciones iniciales de los pulsos, y por último aumentamos la ventana de escaneo para escanear la siguiente parte de la señal envolvente.

Como resultado de la función se obtienen dos vectores, el de las posiciones iniciales de los pulsos calculado al final del bucle, y un vector donde se guardan los valores máximos de la correlación calculados anteriormente.

Tras la ejecución de la función, se nos mostrará la siguiente gráfica.

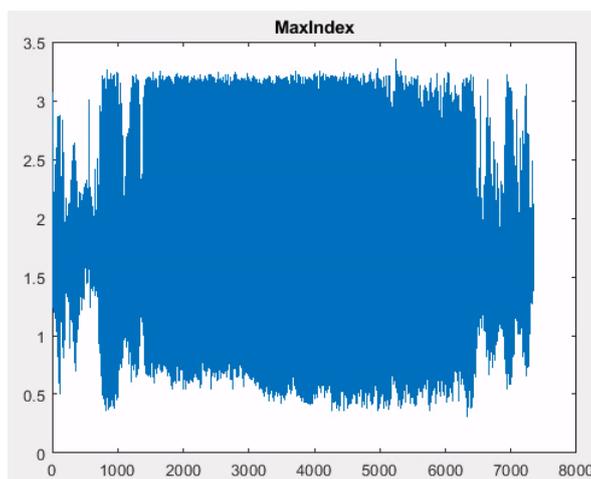


Figura 44. Gráfica de MaxIndex.

En la gráfica de la Figura 44 observamos la variación de los índices máximos de la función anterior, para una correcta decodificación de la señal es necesario seleccionar un umbral adecuado para que la imagen se muestre sin ruido extra. Este umbral debe ser un poco menor que los valores máximos de la gráfica, para seleccionar el valor se utiliza la función **`findpeaks`**, la cual busca los valores máximos de la gráfica que tengan una distancia mínima entre ellos de 20 muestras. Esta función nos devuelve un vector con el valor de los picos solicitados, a continuación, se realiza la media de este vector, y el valor resultante será el valor del umbral que se utilice.

Tras la selección del umbral, se vuelve a utilizar la función **posicion\_inicial**, pero esta vez con el umbral correcto, y tras obtener el vector `pos_inic_pulses` correcto ya es posible crear la matriz de la imagen.

### Crear matriz de la imagen a decodificar:

Como penúltimo paso, se crea la matriz de la imagen a decodificar. Esta matriz tiene tantas columnas como longitud tiene el vector con las posiciones iniciales y tantas filas como la longitud de una línea de la imagen, es decir 1326x5500 aproximadamente.

Se empieza un bucle para construir la imagen, con un puntero “i” que va desde 1 hasta la longitud del vector con las posiciones iniciales de las líneas. En el bucle, primero se calcula la longitud de la línea que vamos a insertar en la matriz imagen, es decir, comprueba que valor es más pequeño, si la longitud de una fila, o la resta entre la longitud de la envolvente y el índice “i” del vector de posiciones iniciales. Por último, en el vector imagen creado, para los índices “i” y un vector desde 1 a la longitud de la señal, guarda los valores de la envolvente que hay entre el índice “i” del vector de posiciones iniciales y el índice “i” del vector de posiciones iniciales más la longitud de la señal menos 1, es decir, guarda una línea de la imagen y las va concatenando por cada iteración.

### Mostrar y guardar la imagen:

Antes de mostrar la imagen y tener la opción de guardarla, se realiza un procesamiento de imagen con el que se ajusta la distribución de intensidades de los píxeles y de esta forma aumentar el contraste y obtener una imagen con mayor luminosidad. El método utilizado es la ecualización de histograma, y para ello se utiliza la función de MatLab **histeq()**.

Como parte final del código, se muestra la imagen. Además, se da la opción de guardar la imagen en formato PNG indicando el nombre que se le quiere dar al archivo. El código finaliza con un `clear`, que sirve para borrar el Workspace, ya que cada vez que se ejecuta el script debe estar limpio para que no se queden guardadas las variables de otras imágenes.

### Pruebas realizadas al script:

Al contrario que con GNU Radio, Matlab es un entorno que no necesita el hardware que se utilizará para probar si funciona o no el script realizado. Por ello, para verificar el correcto funcionamiento del código, se buscó en Internet una base de datos en la cual los usuarios cargan los audios que reciben de satélites NOAA, los cuales están disponibles para descargar. Con ellos se fue probando el código, con el que en un primer momento no se utilizaban funciones, ya que el umbral permanecía siempre igual, y con pasar una vez por la búsqueda de los inicios de línea se tenía suficiente. [21]

Durante el proceso de comprobación del funcionamiento del script, se fue probando con diferentes audios y como es normal empezaron a surgir problemas. En concreto fueron 3 los problemas que impedían el correcto funcionamiento del código:

- En el vector de las posiciones de los inicios de línea no se guardaba nada. Esto era causado por el valor del umbral que era demasiado alto y en la parte donde se genera el vector de los inicios de línea no se guardaba nada y no se generaba la imagen, por ello se escribió la primera línea de la función de los inicios de línea, que inicia el vector a 0, y además en el paso 4 se comprueba si el vector es nulo, y si lo es, disminuir el umbral hasta que no sea 0.
- Imágenes con mucho ruido. Al mostrar las imágenes por pantalla, había algunas que se veían con mucho ruido, esto era debido al umbral, que era demasiado bajo con respecto

a los índices máximos. Por lo que se realizó la línea que llama a la función **findpeaks**, para que cada una de las señales tengan el umbral adecuado.

- Primer valor del vector de inicios de línea negativo. Al calcular el valor máximo de la correlación y relacionarlo con la posición en el vector de lags, se escogía un número negativo en la primera posición, por lo que se incluyó una condición en la que, si esto pasaba, la posición 1 del vector se sustituía por la segunda.

Y tras resolver estos problemas, ya podíamos observar las imágenes decodificadas por el código de MatLab, y comparándolas con las imágenes que decodificamos con el software noaa-apt verificamos el correcto funcionamiento el cual vemos en las imágenes de la Figura 45.

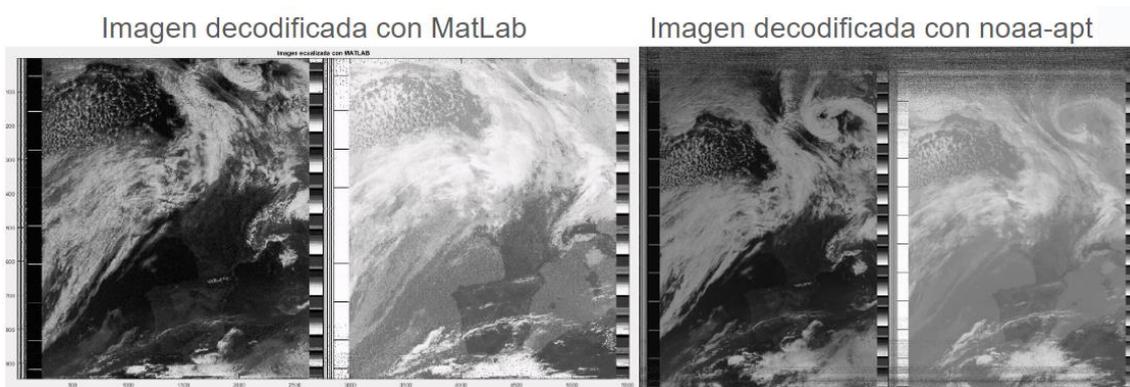


Figura 45. Comparación entre Matlab (Izq.) y noaa-apt (Der.) de una señal de un NOAA 18.

## Capítulo 6. Estación terrena ETSIT

### 6.1 Restricciones del proyecto

Antes de empezar con el desarrollo del experimento, es necesario conocer las características necesarias de los equipos que se deben de utilizar y las restricciones que tendremos a la hora de utilizar el espectro radioeléctrico.

Como se ha comentado en el Capítulo 3, los satélites NOAA que se están estudiando transmiten cada uno a una frecuencia distinta y con polarización circular a derechas (RHCP), por ello será necesario utilizar una antena con la misma polarización para recibir la señal lo mejor posible. Como ejemplo de antenas con polarización circular a derechas tenemos las antenas helicoidales, las antenas quad helix o antenas con dipolos cruzados, que son las antenas que se observan en la Figura 46.

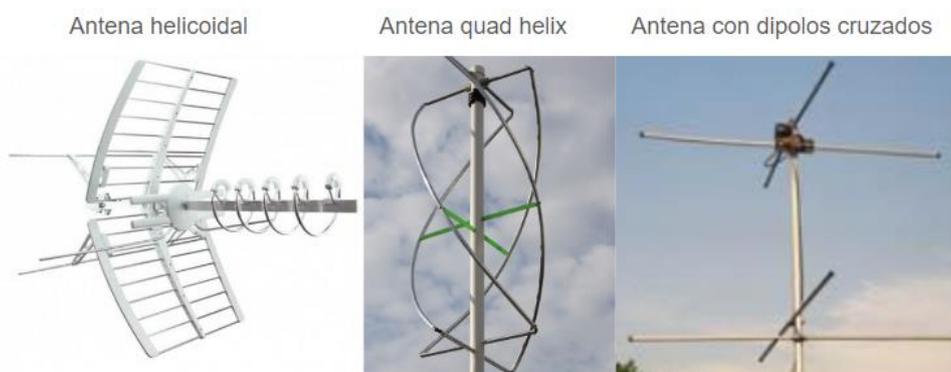


Figura 46. Antenas RHCP.

Con las antenas debemos tener en cuenta además de su polarización, la calidad de la recepción de la señal, ya que pueden existir interferencias dependiendo del diagrama de radiación de la antena que se utilice, y si esto ocurre, se deberá encontrar una forma para mitigarlas lo máximo posible.

También tenemos restricciones aplicadas a los no radioaficionados, las cuales hay que tener muy en cuenta. Algunas de estas restricciones son las siguientes:

Prohibición de transmitir en las bandas de frecuencia específicas de los radioaficionados las cuales regula la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT o ITU en inglés), como es el caso de la frecuencia a la que transmiten los NOAA, por lo que hay que ser precavido y no transmitir. Tampoco se deben causar interferencias a otros usuarios del espectro radioeléctrico, especialmente a las comunicaciones de los satélites meteorológicos. Al no tener la opción de transmitir, no se tendrá ninguna restricción sobre la potencia máxima de transmisión.

Para la instalación de una estación base es importante verificar la “**Ordenanza Reguladora de la Instalación, Modificación y Funcionamiento de los Elementos y Equipos de Telecomunicación que utilicen el Espacio Radioeléctrico**” del Ayuntamiento de Valencia, ya que, según el apartado de **EMPLAZAMIENTOS, CAPÍTULO 3**, es necesaria una serie de condiciones para instalar estaciones base, como pueden ser una autorización del Organismo estatal competente, licencia para las antenas o un certificado final. Además, es necesario el uso de equipos aprobados y que cumplan con las normas técnicas, como por ejemplo los SDR y las antenas si fuese necesario deben estar certificados.

Por último, queda destacar una variable muy importante en el proyecto, los pases de los NOAA. No a todas horas tenemos un NOAA sobre nuestras cabezas, y menos aún tenemos una correcta visibilidad de este, por ello antes de realizar el experimento es necesario una planificación de los

pases de los NOAA durante el periodo de tiempo que se esté desarrollando el experimento. La frecuencia de pases suele ser muy similar todos los días, variando la elevación máxima de cada pase. En la mayoría de los días se tienen en total 6 pases entre las 8 y las 14 horas, en concreto 2 pases para cada uno de los 3 satélites que se monitorizan, uno con una elevación máxima muy pequeña, y otro con una elevación máxima muy grande. A esta variable se le podría llamar también restricción, ya que obliga a realizar el experimento en horas concretas, ya que desde ese pase matinal entre las 8 y las 14 horas, el siguiente pase suele ser entre las 19 y las 23 horas.

Con la característica necesaria de la antena, y las restricciones existentes en el uso del espectro radioeléctrico y de los pases de los satélites, se puede empezar a recopilar el hardware que se utilizará para el desarrollo del experimento.

## 6.2 Hardware utilizado

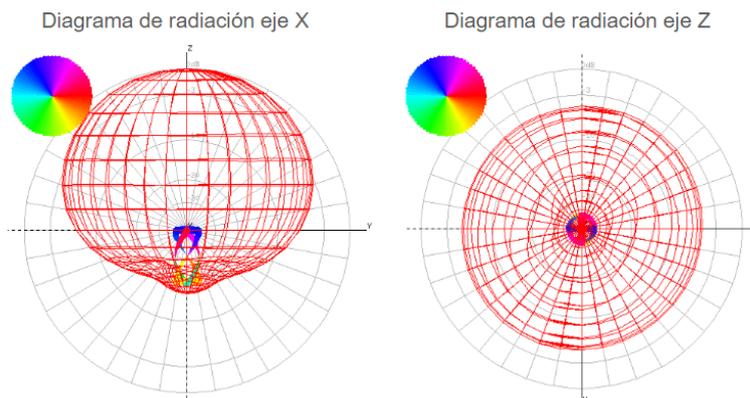
Para evitar problemas con la instalación de una estación terrena en la ciudad de Valencia, y con la Ordenanza local, se utilizará la estación ya existente en la Escuela Superior de Ingenieros de Telecomunicación (ETSIT). Esta estación terrena se encuentra en el edificio 4D de la Universitat Politècnica de València (UPV), en el tercer piso, con entrada a través del laboratorio de desarrollo de radio frecuencias (3.016). Anteriormente se utilizaba como sala de control de la cámara anecoica, pero desde hace un tiempo se cambió para utilizarse como estación terrena, donde estudiantes de máster y de doctorado investigan utilizando el material disponible.

El único problema que tiene esta estación terrena se encuentra al Sur-Oeste de la misma, ya que es donde se alcanzan los edificios de la Facultad de Derecho de la Universitat de València. Pero este es un problema normal al estar situada en la ciudad, pero a pesar de ello, es una buena ubicación, ya que es el único punto donde algún edificio puede quitar visibilidad a la antena.

### 6.2.1 Antena utilizada

Como se ha comentado anteriormente, existe la posibilidad de utilizar diferentes tipos de antena, siempre y cuando estas tengan una polarización circular a derechas.

En la ETSIT, existen varias de estas posibles antenas, ya que sobre el salón de actos hay instalada una antena Quad Helix que se utilizó para el contacto realizado con la ISS durante el curso 2023-2024. Para hacer que esta antena trabaje con polarización circular, se puede diseñar con cada uno de los anillos que se ven en la Figura 46 de un tamaño diferente, el anillo largo reacciona de forma inductiva y el anillo corto de forma capacitiva. Los resultados de esta antena son mejores que los que se obtendría con otro de los ejemplos de la Figura 46, la antena de dipolos cruzados. La antena Quad Helix tiene un diagrama de radiación circular prácticamente perfecto, como se observa en la Figura 47, el diagrama de radiación en el eje Z es omnidireccional, por lo que cubriría prácticamente todo el cielo.



**Figura 47. Diagrama de radiación antena Quad Helix.**

En contraparte, la antena que se sitúa sobre la estación terrena de la ETSIT no es una antena omnidireccional en el plano XY, sino que es una antena direccional. Es una antena Cross Yagi o Yagi Cruzada, como la que se muestra en la Figura 48. Se trata de un kit diseñado para operar con satélites de radio amateur en órbitas LEO, se compone de una antena VHF y otra UHF. Es una antena direccional con el rango de frecuencias comprendido entre 144 y 146 MHz en la banda de VHF y entre 432 y 440 MHz en la banda de UHF, transmite con una potencia de 1500 W en VHF y de 850 W en UHF, todo esto utilizando polarización circular. Si nos centramos en la antena que se va a utilizar, la de VHF, esta tiene una ganancia de 9.4 dBi y una relación Delante/Atrás de 20 dB. La antena Yagi cruzada de VHF se compone de un array de 8 elementos, 4+4, montados sobre una barra central de 1,7 metros de longitud. [23]



**Figura 48. Antena Cross Yagi.**

Como se observa en la Figura 48 y se ha comentado anteriormente, se trata de un kit de dos antenas, pero además de estas dos antenas, el montaje de la estación terrena incluye una antena en banda C con un diámetro de 2 m de longitud. Todo este montaje completo se puede observar en la Figura 49.



Figura 49. Montaje antenas sobre la estación terrena.

La ventaja de esta antena es el rotor que está incorporado, que como se detallará en el próximo punto, sigue el satélite que se le indica desde que entra en el rango de visibilidad, en este caso la mínima elevación de la antena será de  $10^\circ$ , hasta que termine el pase del satélite. Cubre todo el acimut, de  $0^\circ$  a  $360^\circ$ , y toda la elevación a partir de los  $10^\circ$ .

Tras la comparación realizada de ambas antenas, aunque en muchos proyectos se utilice la antena Quad Helix, en este caso vamos a utilizar la Cross Yagi. Ya que el tener un rotor instalado y estar sobre la estación terrena ya montada, facilita el desarrollo del experimento. Además, obtenemos una ganancia mayor con esta antena direccional y la posibilidad de que la ganancia no disminuya durante el pase del satélite como si podría ocurrir con la antena Quad Helix. La antena Quad Helix también es más vulnerable a las interferencias de RF alrededor de su posición, ya que no tiene forma de evitarlas, así como la Cross Yagi sí que puede al tener nulos en su diagrama de radiación y solo recibir la señal donde apunta la antena, que como en este caso es el cielo, no tendremos problemas de que una interferencia se encuentre al lugar donde apunta la antena. Mitigando de esta forma un riesgo alto que tendríamos con la antena Quad Helix, que habría tenido un impacto alto sobre el desarrollo del experimento, y aumentamos las probabilidades de unos buenos resultados al finalizarlo.

### 6.2.2 Equipamiento estación terrena

Dentro de la estación terrena, encontramos un Rack, que es una estructura que se utiliza para almacenar los dispositivos tecnológicos que se van a utilizar.

#### Fuente de alimentación

El primer elemento que encontramos en el Rack es la fuente de alimentación, Figura 50, que alimenta al rotor de la antena y su respectivo controlador. Administra 15V para el controlador del rotor y 24V para el rotor.



Figura 50. Fuente de alimentación.

### Rotor de la antena

Debajo de la fuente de alimentación encontramos el controlador del rotor de la antena, el modelo MD-01, Figura 51, que se utiliza para controlar el SPID BIG-RAS/HR, Figura 52.

El controlador incluye una pantalla en la que se observa el azimut y la elevación donde apunta la antena gracias al rotor. Para el seguimiento de los satélites se utiliza el programa Orbitron junto al software del controlador del rotor, de esta forma, indicando a Orbitron el satélite al que debe seguir, el controlador comunica al rotor donde debe apuntar, y cuando está a la vista la antena realiza el seguimiento del satélite.

El rotor SPID BIG-RAS/HR es un sistema de alta precisión, es decir, de seguimiento, que es utilizado para controlar el azimut y la elevación de la antena utilizada. Para no forzar el rotor, la elevación mínima a la que apuntará es de 10°.

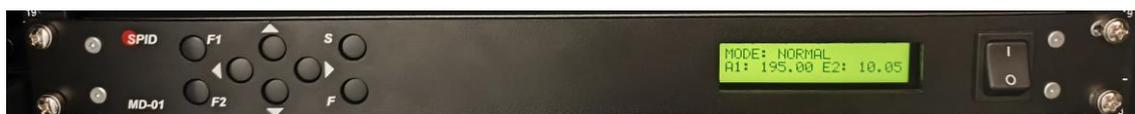


Figura 51. Controlador del rotor SPID MD-01.



Figura 52. Rotor de la antena SPID BIG-RAS/HR.

### Secuenciador

El siguiente elemento del Rack es el secuenciador, Figura 53, que se encarga de controlar el uso del preamplificador y del amplificador, en nuestro caso solo se va a utilizar el preamplificador.



Figura 53. Secuenciador.

El corazón del secuenciador lo encontramos en sus conexiones en su parte posterior y lo observamos en la Figura 54:

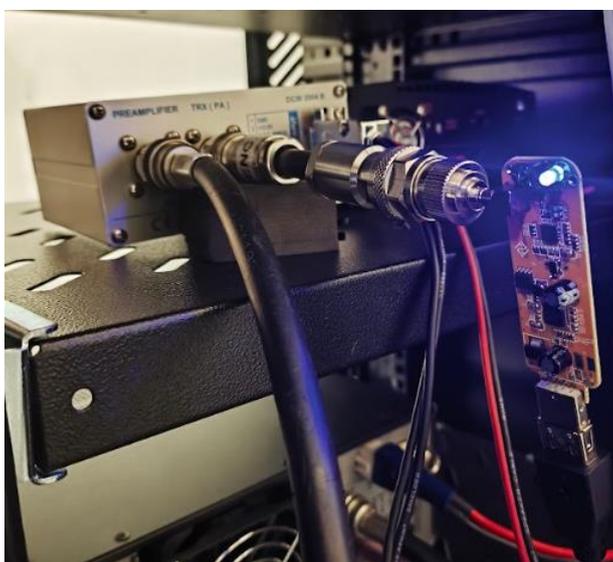


Figura 54. Conexiones secuenciador.

Vemos que las conexiones que tenemos en esta parte del secuenciador son la entrada del cable coaxial de la antena al preamplificador y la salida del transceptor al SDR que se explicará más adelante. El cable coaxial conectado al preamplificador es el que proviene de la antena, siendo el preamplificador el primer elemento de la cadena de recepción tras la antena. El puerto del transceptor lo utilizamos como puerto de salida del secuenciador, estando éste conectado directamente al SDR utilizado.

### RTL-SDR [24]

De forma tradicional, los equipos transmisores y receptores de radiofrecuencias se componían de componentes electrónicos que formaban circuitos como osciladores, filtros, amplificadores, etc., se definen como Radios Hardware. En un SDR la funcionalidad de varios componentes de radio se implementa mediante software en lugar de utilizar un hardware dedicado.

Son dispositivos de bajo coste fáciles de utilizar con un ordenador, ya que se conecta mediante USB. Contiene una serie de bloques básicos que se pueden clasificar en sección de RF, FI y banda base. La parte de RF se implementa mediante hardware, al igual que la de IF, al contrario que la

de banda base que es la que se implementa mediante software. El dispositivo recibe la señal de radiofrecuencia, a continuación se adecuan estas frecuencias a frecuencias intermedias y finalmente la sección de IF traslada la señal a banda base, se digitaliza y a través de la conexión USB antes mencionada se extraen las muestras. Hoy en día, los SDR más sencillos como el que vemos en la Figura 54 pueden llegar a funcionar entre los 25 MHz y 1.75 GHz.

La cadena de recepción de nuestro sistema es la mostrada en la Figura 55, donde la antena es la que se encuentra en la azotea del edificio, y el preamplificador es la conexión al secuenciador. De esta forma, el resto de los componentes de la cadena hasta llegar a la salida digital son los componentes del SDR.

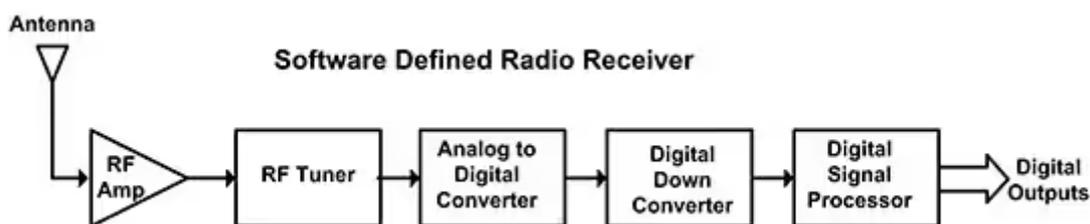


Figura 55. Cadena de recepción.

Existen diferentes tipos de SDR, desde SDR tipo USB dongle de entre 20-50 euros, con las funciones limitadas de recepción, hasta Lime SDR de entre 200-400 euros, que integran un sistema operativo Ubuntu, con los que se pueden descargar apps de diferentes desarrolladores de todo el mundo para utilizar en el SDR. También existe la posibilidad de crear un servidor SDR con la combinación de un SDR y una Raspberry PI, para poder conectarse de forma remota al SDR.

En nuestro caso se ha utilizado un SDR con chip RTL2832U, cubriendo una amplia gama de frecuencias que como se ha dicho anteriormente oscila entre los 24 MHz y 1.7 GHz. Es un receptor de banda ancha, con capacidad de hasta un ancho de banda de 3.2 MHz, que no solo cubre las bandas de AM y FM, sino que también cubre bandas como VHF, UHF, bandas marítimas, aeronáuticas o militares. Tiene una sensibilidad de recepción superior a  $-80$  dBm, por lo que permite detectar señales débiles y distantes. Es compatible con los 3 sistemas operativos más utilizados, en nuestro caso no tendremos problema al utilizar Windows.

### Polarización de la antena

Como se ha comentado anteriormente, la antena utilizada puede trabajar con 4 tipos de polarizaciones: Lineal Vertical, Lineal Horizontal, Circular a derechas y Circular a izquierdas. La forma de controlar la polarización de la antena durante los procesos de recepción es mediante un conmutador conectado a una fuente de alimentación. Para activar este conmutador es necesario alimentarlo con 12 V con la fuente de alimentación de la Figura 56.

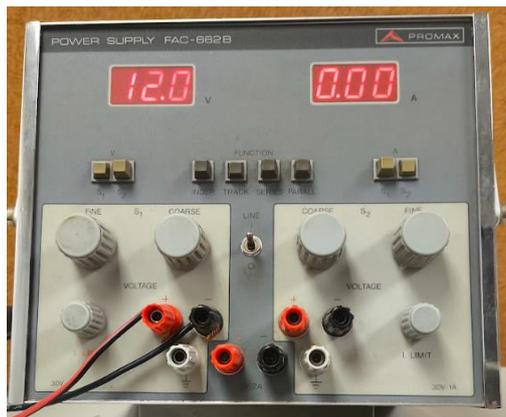


Figura 56. Fuente de alimentación conmutador de la antena.

Esta fuente de alimentación se conecta al conmutador que se observa en la Figura 57.



Figura 57. Conmutador antena.

Con el switch de la imagen, se cambia entre la polarización a la que se necesita que trabaje la antena. Y como es capaz de trabajar en VHF o en UHF, es necesario un switch específico para cada una de las bandas de frecuencia. Si el conmutado no se alimenta con los 12V, la antena trabajará con polarización Lineal Vertical de forma predeterminada.

### Ordenador

Por último, tenemos el equipo que se ha utilizado para realizar el experimento. En él, tenemos todos los programas necesarios para el correcto funcionamiento de la estación terrena, desde el Orbitron hasta el GNU Radio. A su interfaz USB es donde se conecta la salida de USB del SDR utilizado.

## Capítulo 7. Desarrollo del experimento

### 7.1 Introducción al experimento

El desarrollo del experimento se realizó en el espacio de 3 días durante el mes de mayo en la estación terrena de la ETSIT descrita anteriormente. Durante el desarrollo del experimento se realizó una familiarización con el equipamiento a utilizar (hardware y software), se realizaron las primeras pruebas del software programado y finalmente se solucionaron los problemas que surgieron.

Para comprobar si el esquema en GNU Radio funcionaba de forma correcta, se utilizó la metodología de experimento controlado. Esta metodología se basa en comparar el comportamiento de algo diseñado desde cero con algo que ya se sabe que tiene un correcto funcionamiento, en este caso comprobaremos si el esquema de GNU Radio recibe la señal de forma correcta comparándolo con el software descrito anteriormente, Airspy SDR. Es la misma metodología que se utilizó para probar el funcionamiento del programa de Matlab en anteriores capítulos y que se utilizará en los resultados del experimento.

Es importante controlar el riesgo de que el equipo utilizado para la recepción de la señal genere errores, como la falta de conexión de algún dispositivo o el fallo crítico de algún componente del sistema. Este es un riesgo con poca probabilidad de que ocurra, ya que la estación está siendo usada casi a diario por investigadores, pero si ocurriese tendría un impacto alto sobre el desarrollo del experimento, impidiendo su desarrollo. Por ello, cada uno de los días en los que se realiza el experimento, el primer paso es verificar el instrumental a utilizar. Para ello, el primer pase se recibe con el software Airspy SDR, ya que como el diseño de GNU Radio no está terminado del todo hasta el final del experimento, sirve de ayuda para la comprobación del equipo. Con este software, como se explica durante el siguiente punto, verificaremos la correcta recepción del pitido característico de los NOAA, ya que esta es la mejor prueba posible de un correcto funcionamiento de toda la cadena de recepción de la señal.

Antes de empezar con el experimento, se ha recopilado información de la AEMET para obtener una previsión del tiempo durante los días del experimento, ya que siempre existe el riesgo de tener atenuación por lluvia o por nubes. Siendo el mes de mayo del 2024 un mes seco en la parte del litoral Mediterráneo, confirmándose que durante las dos semanas en las que se iba a desarrollar el experimento no existiría el riesgo de que el tiempo afectara al desarrollo.

### 7.2 Experimento

#### 7.2.1 Primer día

El primer día que se visitó la estación terrena, se realizó una breve explicación de para que y quienes la utilizaban. Es utilizada para la investigación de satélites por estudiantes de Máster, cursando el Trabajo Final de Máster, y estudiantes de Doctorado. Desde la estación, junto con el salón de actos, se realizó la comunicación con la ISS en el mes de febrero.

Además, se realizó una breve explicación del hardware que se utiliza en la estación y su funcionamiento, como ya se explica anteriormente, y se probó el software Airspy SDR para comprobar la correcta recepción de las señales APT y a continuación la decodificación de la imagen recibida. De esta forma se comprueba que es posible un correcto desarrollo del experimento, y solo faltaría comprobar el funcionamiento del esquema realizado en GNU Radio.

### 7.2.2 Segundo día

Tras la primera toma de contacto con la estación, el siguiente día daba comienzo el experimento, pero antes de empezar, se documentaron los pases de los NOAA en el día indicado. De esta forma se realizó un planning para tener controlados todos los pases de los satélites y poder probar el programa la máxima cantidad de veces posible y obtener soluciones a los problemas de una forma más dinámica.

Para la documentación de los pases de los NOAA, se utilizó la página web N2YO [22]. Se trata de una página web de seguimiento de satélites, donde podemos seleccionar el satélite que queremos seguir, indicar nuestra posición y obtenemos una predicción a 10 días vista de los pases de los satélites. Por ejemplo, en la siguiente imagen podemos observar que como previsión nos da una tabla con la fecha en la que se empieza a ver el satélite y el azimut en ese momento, las características del satélite cuando se encuentra en la máxima altitud y por último cuando finaliza el pase del satélite, esta información se muestra en una tabla como la de la Figura 58.

Start		Max altitude			End	
Date, Local time	Az	Local time	Az	EI	Local time	Az
25-May 19:27	ESE 120°	19:33	ENE 62°	17°	19:39	N 6°
25-May 21:05	S 174°	21:12	W 259°	62°	21:20	NNW 343°
26-May 09:20	NNE 18°	09:28	E 99°	54°	09:35	S 182°
26-May 11:01	N 357°	11:07	WNW 296°	19°	11:13	SW 237°
26-May 20:39	SSE 161°	20:47	ENE 68°	76°	20:54	N 349°

Figura 58. Previsión de la página web N2YO.com.

Para el primer día del experimento, que fue el día 9 de mayo de 2024, obtuvimos los siguientes pases:

Satélite	Hora de inicio	Hora de finalización	Máxima elevación (grados)
NOAA 19	11:04	11:19	47°
	12:45	12:59	23°
NOAA 18	12:22	12:37	38°
	14:03	14:18	27°
NOAA 15	9:58	10:13	68°

Tabla 3. Pases satélites 9 de mayo.

A pesar de ser pases con poca elevación, se tiene la ventaja de que eran 5 pases bastante separados en el tiempo, lo que provocaba que se tuviese más tiempo para realizar los cambios necesarios entre pase y pase.

Durante el primer pase del día, a las 9:58, no se pudieron realizar pruebas debido a un problema técnico del programa GNU Radio, el cual no compilaba de forma correcta el código Python, la solución del problema fue la eliminación del bloque Doppler Correction, pero cuando se resolvió el error el satélite ya se encontraba a poca elevación por lo que se decidió hacer la primera prueba de nuevo con el Airspy SDR y comprobar que todo el instrumental de la estación base funcionaba de forma correcta. Perder este pase fue un gran problema, ya que era el que mayor elevación iba a tener durante el día y del que se podía obtener una mejor claridad de señal y de imagen. Tras comprobarlo en el programa Orbitron, no sería necesaria la corrección del efecto Doppler a través de los bloques de GNU Radio.

En el segundo pase, a las 11:04, ya se realizaron las primeras pruebas con GNU Radio. Estas pruebas ayudaron a comprobar que había fallos en el programa, ya que comparando con la señal que recibíamos con el Airspy, la nitidez de la señal era prácticamente nula, por lo que, al intentar decodificar la imagen, no se recibió ni la señal de sincronización ni la telemetría, por lo que había que empezar a retocar el esquema de GNU Radio antes del siguiente pase.

La primera conclusión a la que se llegó tras esta primera prueba fue la eliminación del bloque Throttle del esquema, ya que en ningún momento se va a tener una tasa tan grande como la indicada y no necesitamos un control de esta. Tras buscar en la documentación del bloque Throttle, se observó que puede afectar al rendimiento del esquema si no se utiliza correctamente, por lo que se eliminó de forma definitiva. Siendo hasta este momento el único cambio realizado.

Para los siguientes 2 pases, no había mucho tiempo de reacción, por lo que durante el tercer pase del día a las 12:22 del NOAA 18, se obtuvieron unos resultados algo mejores que en el anterior pase, pero se seguía sin obtener una señal nítida, así como con el Airspy obteníamos una señal muy nítida en la que se escuchaba con gran calidad el pitido que transmiten los satélites. Por ello, para el siguiente pase, se decidió solo realizar pruebas con el esquema de GNU Radio, y las pruebas realizadas fue ir aumentando de forma progresiva la frecuencia de muestreo inicial del SDR. Se fue aumentando progresivamente el valor de la Variable “fs”, teniendo en cuenta que al cambiar el valor de esta frecuencia de muestreo también se debía modificar la entrada del Rational Resampler ya que esta es el resultado de diezmar la frecuencia de muestreo por 4. Tras subir la frecuencia de muestreo se llegó al valor de 2.56 MSPS (mega samples per second), a partir del cual, la nitidez ya no mejoraba, y aunque se recibía mejor que al principio del día, aún eran necesarias modificaciones para una correcta recepción.

Entre el penúltimo y el último pase del día, se investigó un poco más sobre el SDR que se estaba utilizando, centrándose en su funcionamiento tras la recepción de la señal. Se llegó a la conclusión de que, tras la recepción de la señal a la frecuencia indicada, el SDR ya centra la señal en el espectro, por lo que no era necesario durante el esquema la creación de un oscilador local para trasladar la frecuencia de los NOAA, por lo que el paso de centrar la señal con los bloques Signal Source y Multiply se eliminó, dejando conectada directamente la salida del SDR al filtro FIR.

Este último pase, a las 14:03, era el peor junto con el anterior, con peor se refiere a un pase con una elevación muy pequeña. Y tras realizar las modificaciones descritas anteriormente, se obtuvo una nitidez mucho mayor de la señal, aunque aún era muy mejorable, lo que se corrigió durante el último día del experimento.

### 7.2.3 Planificación tercer día

Antes de decidir el siguiente día, se realizó un estudio de los pases de los 3 satélites durante los siguientes 5 días, se volvió a utilizar la página web N2YO.com. El principal objetivo de este estudio era determinar qué día era el más indicado para realizar las pruebas del experimento. Para ello, se deberían cumplir tres condiciones en los pases de los satélites:

1. Tener la mayor cantidad de pases posibles durante el horario en el que se iba a estar en la estación terrena.

2. Dentro de la cantidad de pases, que al menos cerca de la mitad sean de gran calidad, es decir, que se encuentren entre los 60 y 90 grados de elevación máxima.
3. Que hubiese pases entre los 30 y los 50 grados de elevación y entre los 0 y los 30 grados. Esto para poder comprobar con pases de “mala calidad” la correcta recepción de la señal.

Tras establecer las condiciones, el siguiente paso es documentar los pases diferenciando el día y verificando el cumplimiento de las condiciones propuestas:

1. 13 de mayo del 2024:

Satélite	Hora de inicio	Hora de finalización	Máxima elevación (grados)
NOAA 19	10:15	10:29	17
	11:55	12:11	61
NOAA 18	11:33	11:45	13
	13:13	13:28	74
NOAA 15	9:55	10:10	72

**Tabla 4. Pases 13 de mayo**

Con un total de 5 pases, es el día con menos cantidad de todos los documentados, por lo que a pesar de tener 3 pases de buena calidad se descarta, ya que deja sin margen de modificar el esquema comparado con otros días.

2. 14 de mayo del 2024:

Satélite	Hora de inicio	Hora de finalización	Máxima elevación (grados)
NOAA 19	10:03	10:16	13
	11:43	11:58	79
	13:25	13:36	11
NOAA 18	13:00	13:15	85
	14:42	14:54	13
NOAA 15	9:29	9:44	66
	11:10	11:22	16

**Tabla 5. Pases 14 de mayo**

El día 14 es el día con más pases de todos los días documentados con un total de 7. Tiene 3 pases de muy buena calidad, en 2 de ellos pasando el satélite prácticamente por encima de la estación, aunque ninguno de calidad media, todos los demás son de una elevación máxima menor de 30 grados. Se tendrá en cuenta como uno de los días para realizar el experimento.

3. 15 de mayo del 2024:

Satélite	Hora de inicio	Hora de finalización	Máxima elevación (grados)
NOAA 19	11:31	11:46	81
	13:12	13:24	14
NOAA 18	12:48	13:03	66
	14:29	14:42	17
NOAA 15	9:04	9:18	37
	10:44	10:57	26

**Tabla 6. Pases 15 de mayo**

Desde este punto, todos los días tienen un total de 6 pases. El día 15 tiene 2 pases de muy buena calidad, 1 de calidad media y 3 de baja calidad. Es un día con muchas posibilidades de realizar pruebas con los 3 tipos de pase que se han descrito.

4. 16 de mayo del 2024:

Satélite	Hora de inicio	Hora de finalización	Máxima elevación (grados)
NOAA 19	11:18	11:34	63
	13:00	13:13	18
NOAA 18	12:35	12:50	51
	14:16	14:30	21
NOAA 15	8:39	8:52	22
	10:18	10:32	44

**Tabla 7. Pases 16 de mayo**

El día 16, a pesar de tener 6 pases, solo se tiene 1 de buena calidad y 2 de calidad media, por lo que se descarta como día del experimento.

5. 17 de mayo del 2024:

Satélite	Hora de inicio	Hora de finalización	Máxima elevación (grados)
NOAA 19	11:06	11:21	49
	12:47	13:01	23
NOAA 18	12:23	12:38	39
	14:04	14:18	27
NOAA 15	8:13	8:25	12
	9:52	10:07	77

**Tabla 8. Pases 17 de mayo**

Por último, el día 17 vuelve a tener tan solo 1 pase de buena calidad y 2 de calidad media, por lo que igual que el día 16, se descarta como día del experimento.

Tras comprobar los 5 días, nos quedamos con 2 posibles días: el 14 y el 15 de mayo. Las diferencias entre estos dos días son claras: el 14 tenemos mayor cantidad de pases, pero ninguno de calidad media, y el día 15 tenemos menos cantidad de pases, pero más rangos de calidad del pase que en el día anterior.

Tras estudiarlo, se decide que finalmente el día que se realizará el experimento es el 14 de mayo. Se decidió este día por tener mayor cantidad de pases, y por si no se consiguiera el objetivo tener el día 15 como salvaguarda.

Hasta llegar al día del experimento, se modificó el esquema de GNU Radio, se incluyeron gráficas para poder observar el espectro de la señal, en lugar de tan solo poder escucharla, de esta manera se puede entender con mayor claridad lo que le ocurre a la señal durante el procesado. Fueron 3 las gráficas que se incluyeron, una a la salida del SDR, donde comprobamos que efectivamente la señal que sale del SDR ya está centrada en frecuencia, otra gráfica a la salida del filtro FIR que sirve para observar que modificación realiza el filtro a la señal, y por último tras el demodulador.

#### **7.2.4 Tercer día**

Llegado el 14 de mayo, se empezó a las 9:29 con el primer pase del NOAA 15. Durante este primer pase, comprobamos si las gráficas se veían correctamente y se ajustaron los parámetros para una correcta visualización y se confirmaron los resultados del anterior día, faltaba nitidez en la señal recibida al utilizar GNU Radio. También se realizaron las verificaciones del sistema de recepción utilizando Airspy SDR.

El único bloque que faltaba por modificar era el filtro FIR, por lo que en los 15 minutos que había entre el pase del NOAA 15 y el del NOAA 19 se cambió el bloque del filtro FIR, llamado “Decimating FIR Filter”, por el bloque “Low Pass Filter”, de esta forma solo tenemos el filtro paso bajo y no es necesaria la instrucción que indicábamos en el anterior bloque para crear el filtro paso bajo.

En el segundo pase del día, a las 10:03, se recibió una señal mucho más nítida, llegando a escuchar con claridad el pitido característico de los NOAA en el punto con mayor elevación, pero no con una larga duración.

Con más tiempo hasta el siguiente pase, se investigó el nuevo bloque incluido en el esquema, llegando a la conclusión de que, al ser el siguiente pase de mala calidad, probar a cambiar la

frecuencia de corte del filtro, pasar de 20 kHz a 40 kHz, a pesar de que en la documentación del bloque indique que funciona como se ve en la Figura 39, siendo el ancho banda total del filtro el doble de la frecuencia de muestreo.

Ya en el tercer pase del día, a las 11:10, tras realizar el cambio de la frecuencia de corte del filtro, la nitidez de la señal mejoró enormemente, llegando a la conclusión de que en el nuevo bloque de filtro paso bajo, la frecuencia de corte y el ancho de banda de la señal deben de ser el mismo. A pesar de tener ya una mayor calidad en la señal recibida, se podía mejorar aún más.

Para el cuarto pase, la idea fue probar las diferentes opciones de tipo de ventana que ofrece el bloque del filtro paso bajo, siendo las siguientes ventanas las posibles: Hamming, Hann, Rectangular y Blackman. Hasta ahora se había utilizado la ventana de tipo Hamming.

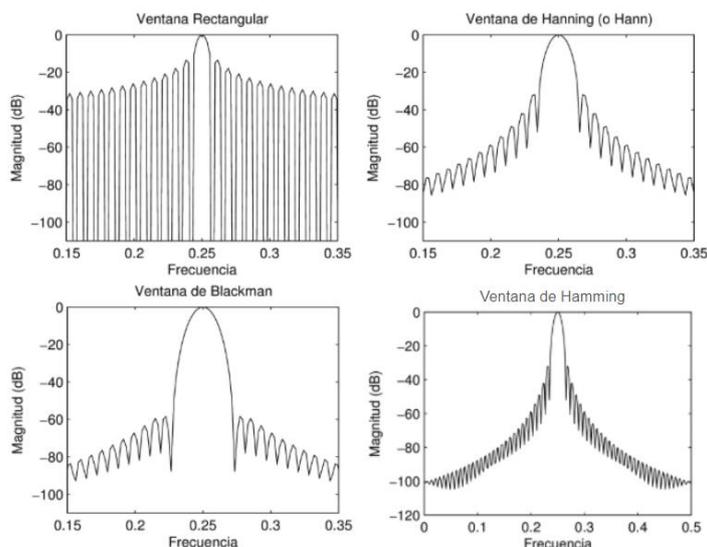
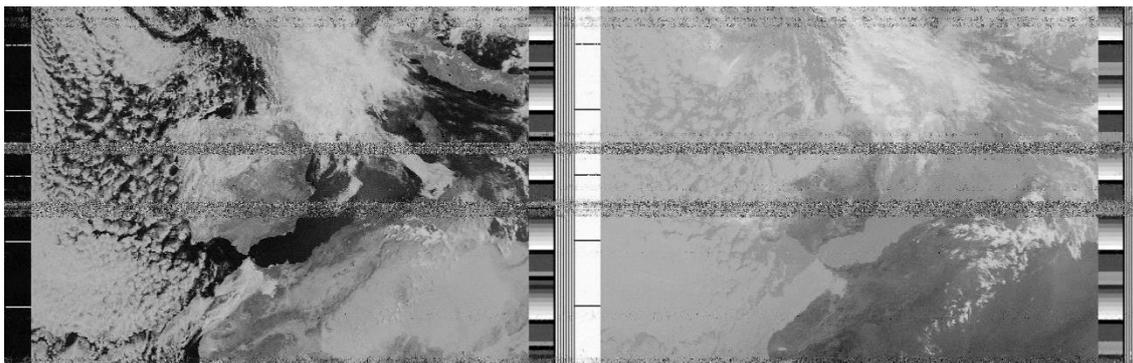


Figura 59. Comparación de ventanas.

Por lo que se puede observar en la Figura 59, la ventana rectangular la podemos descartar, ya que los lóbulos secundarios no se atenúan y nos interesa que se atenúen lo máximo posible. En la ventana de Hanning se tiene un problema similar, a pesar de que los lóbulos secundarios se atenúen más que en la rectangular, la transición sigue siendo muy suave. La ventana de Hamming, que es la que se había estado utilizando hasta este momento, ya sabemos que, a pesar de que funcione correctamente, no da toda la nitidez requerida para poder decodificar la imagen más adelante. Por último, la ventana de Blackman tiene un gran lóbulo principal, y los secundarios se atenúan mucho desde el primero de ellos, por lo que será la ventana que se probará durante el siguiente pase.

El cuarto pase del día, a las 11:43, era un pase de muy buena calidad, pasando el NOAA 19 prácticamente por encima de la estación terrena, por lo que era el mejor momento para probar si todos los cambios realizados durante el día funcionaban de forma correcta. Nada más tener el satélite a la vista, se ejecutó el programa, obteniendo, ahora sí, una señal muy buena, pudiendo escuchar durante prácticamente el 100% del pase el pitido que transmiten en la señal los NOAA de forma muy nítida. Y para comprobar que la señal se ha recibido correctamente, mediante el programa WxtoImg se decodificó la imagen, obteniendo el resultado de la Figura 60:

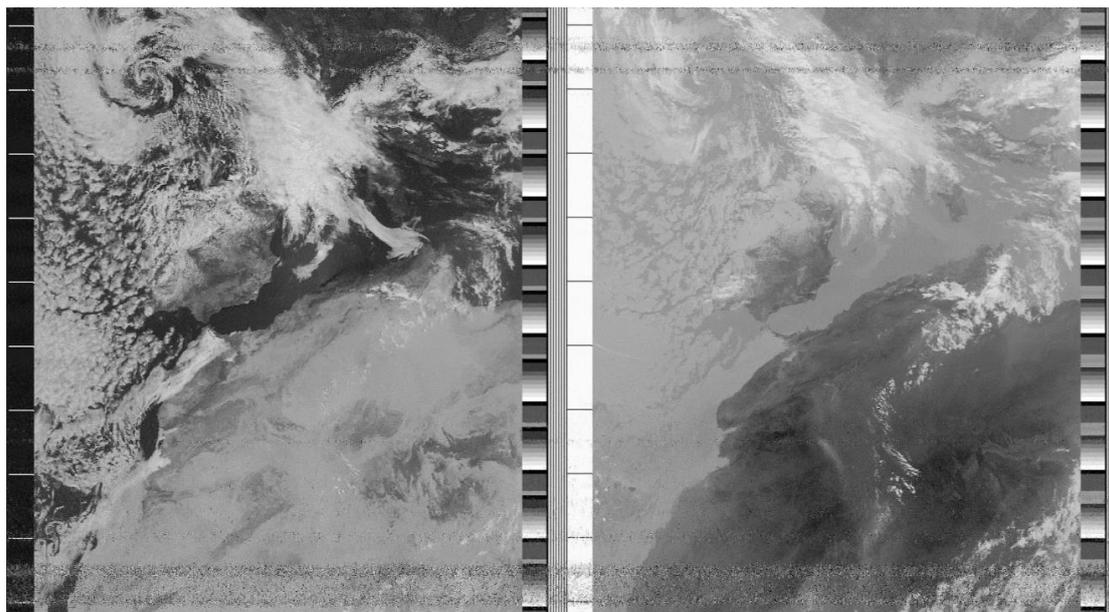


**Figura 60. Imagen decodificada NOAA 19. Pase de buena calidad.**

Donde se puede observar pequeños tramos de ruido que coinciden en el tiempo con los momentos que no se recibía con nitidez la señal. Pero a pesar de ello, se distingue de una forma muy clara la Península Ibérica y el norte de África, además de las nubes que cubrían la zona en dicho momento.

El quinto pase de los satélites era a las 13:00, por lo que con tiempo por delante se decidió buscar la manera de conseguir que en un pase bueno se recibiese la señal sin ruido cuando la elevación es relativamente buena. Para ello, el último parámetro que quedaba por modificar era el ancho de banda de transición del filtro paso bajo. La forma de realizar pruebas con este parámetro fue sintonizar la radio FM de la Universitat Politècnica de València, la cual se encuentra a la frecuencia 102.5 MHz. Al sintonizarla se escuchaba bien, pero al ir subiendo poco a poco el ancho de banda de transición empezó a escucharse mucho mejor, y al pasar de 30 kHz ya no se notaba ningún cambio, por lo que la frecuencia elegida fue 30 kHz.

El quinto pase fue del NOAA 18 a las 13:00, con una elevación máxima de 85 grados, por lo que era la mejor oportunidad para comprobar el correcto funcionamiento del esquema en GNU Radio. Durante el principio del pase se notaba que aún había ruido que interfería en la señal, pero al momento se empezó recibir la señal mucho más limpia. Durante todo el pase la señal fue limpia, por lo que solo quedaba comprobar si con el audio recibido se podía ver la imagen que había transmitido el satélite, obteniendo el resultado de la Figura 61:



**Figura 61. Imagen decodificada NOAA 18. Pase de buena calidad.**

Donde se puede diferenciar claramente la Península Ibérica junto con el norte de África, de nuevo, y además ya podríamos realizar la función principal de los satélites meteorológicos, ya que comparando las imágenes separadas 1 hora, se observa que el frente de nubes sobre el mar Mediterráneo se estaba disipando poco a poco.

Tras este pase de gran calidad, ya solo quedaba probar si con un pase con calidad muy baja se podía obtener una imagen lo más nítida posible, por lo que el siguiente pase a las 13:25, con 11 grados de elevación máxima, era el idóneo.

A las 13:25 se empezó a grabar el pase, que tenía una duración de 11 minutos. Como era el peor pase hasta el momento, se decidió hacer la mitad del pase con GNU Radio y la otra mitad con Airspy SDR para comprobar la diferencia de la nitidez entre ambos programas. Aunque el resultado fue que con el Airspy SDR se obtenía una mayor nitidez, el resultado con GNU Radio de un pase tan bajo fue la que se observa en la Figura 62:

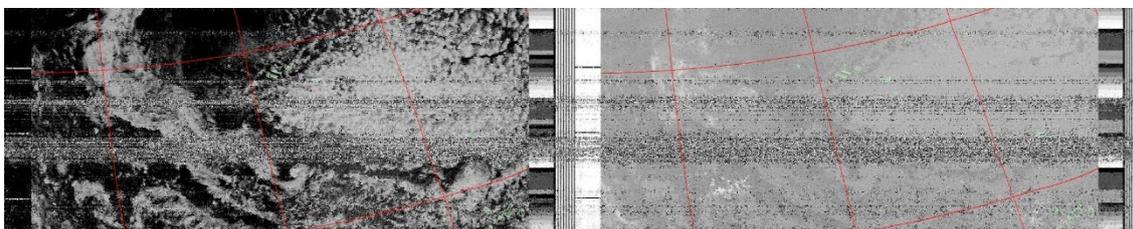


Figura 62. Imagen decodificada del NOAA 19. Pase de baja calidad.

Donde se el resultado es bueno, pudiéndose ver que la señal de sincronismo se ha recibido de manera correcta, y la telemetría también. Sabemos que la telemetría se ha recibido de forma correcta porque el programa WxtoIm tiene la opción de mediante la telemetría marcar las zonas de superficie en la imagen, en este caso, en la esquina inferior derecha de cada una de las imágenes se marcan en verde las siluetas de parte de las Islas Canarias, llegando a la conclusión por su posición, de que las islas que se encuentran en el centro de la imagen son las Azores, coincidiendo con el seguimiento del satélite realizado con Orbitron, como se observa en la Figura 63.

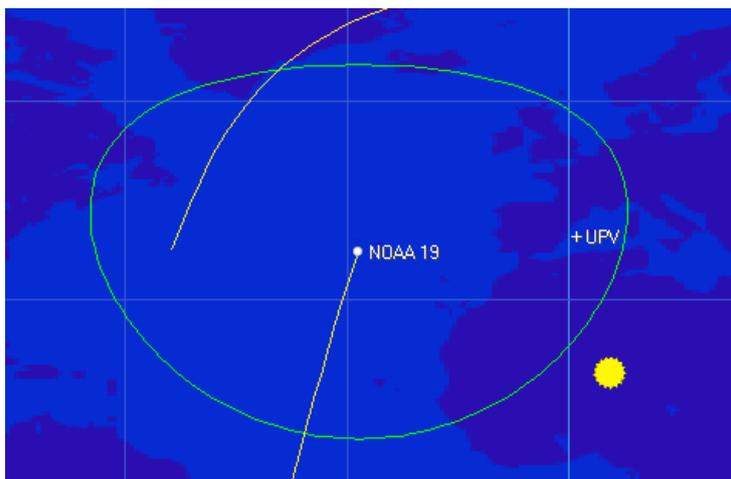


Figura 63. Posición del NOAA 19.



Tras esta última prueba se dio por finalizado el tercer día del experimento, solo quedando la comprobación del funcionamiento del programa de Matlab con los audios obtenidos y las conclusiones del proyecto.

## Capítulo 8. Resultados

Tras finalizar el desarrollo del experimento, quedan dos cosas pendientes: mostrar el nuevo esquema de GNU Radio con los cambios realizados durante los dos días del experimento y comprobar que el programa en Matlab decodifica las imágenes de forma correcta con los audios obtenidos anteriormente.

### 8.1 Resultado decodificador en Matlab

Primero se comprobará si el programa de Matlab realiza la decodificación correcta de los audios, para ello se realizará una metodología similar a la realizada en el experimento, en la que compararemos las imágenes que se obtienen con Matlab y las que se obtienen con WxtoImg y noaa-apt.

La comprobación se realizará con los dos últimos audios obtenidos el día del experimento. Para ello es necesario que los audios a decodificar se encuentren en la carpeta donde está el script de Matlab o indicar la ruta donde están guardados los archivos de audio.

En la primera línea del código se indicará el nombre del archivo y a continuación se ejecutará el script. Como se comentó en el Capítulo 5, el primer paso del script es filtrar la señal con un filtro paso banda y calcular la envolvente, y en el caso de la señal recibida en el quinto pase del día del experimento obtenemos la envolvente de la señal de la Figura 64.

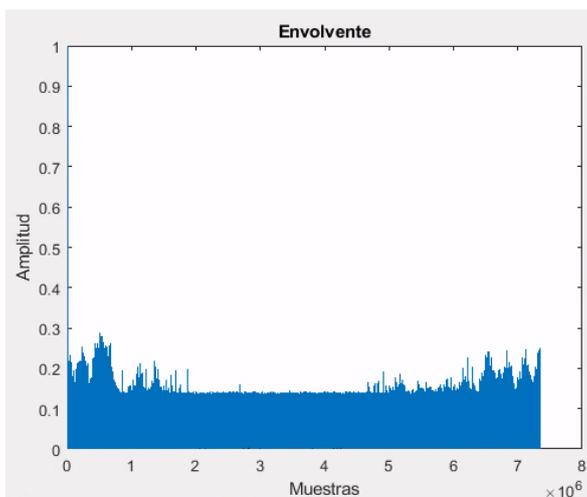


Figura 64. Envolvente de la señal.

A continuación, se creará una señal de sincronismo, cuya imagen ya se vio en la Figura 43 en el Capítulo 5. El siguiente paso es el cálculo de los inicios de línea y la intervención del usuario para indicar el umbral para la correcta decodificación, poniendo el mismo ejemplo que en el Capítulo 5, el programa nos muestra la gráfica de la Figura 65, a partir de la cual debemos escoger el umbral.

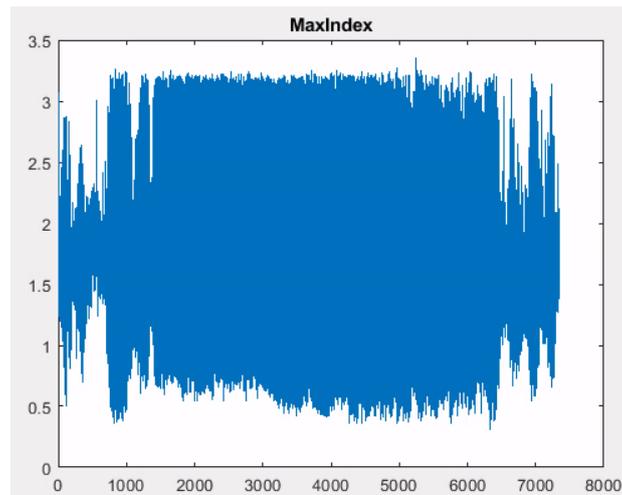


Figura 65. Gráfica de índices máximos del quinto pase.

Observando la gráfica, el umbral tendrá un valor de entre 2.7 y 3.1, aproximadamente. El programa nos mostrará la imagen de la Figura 66:

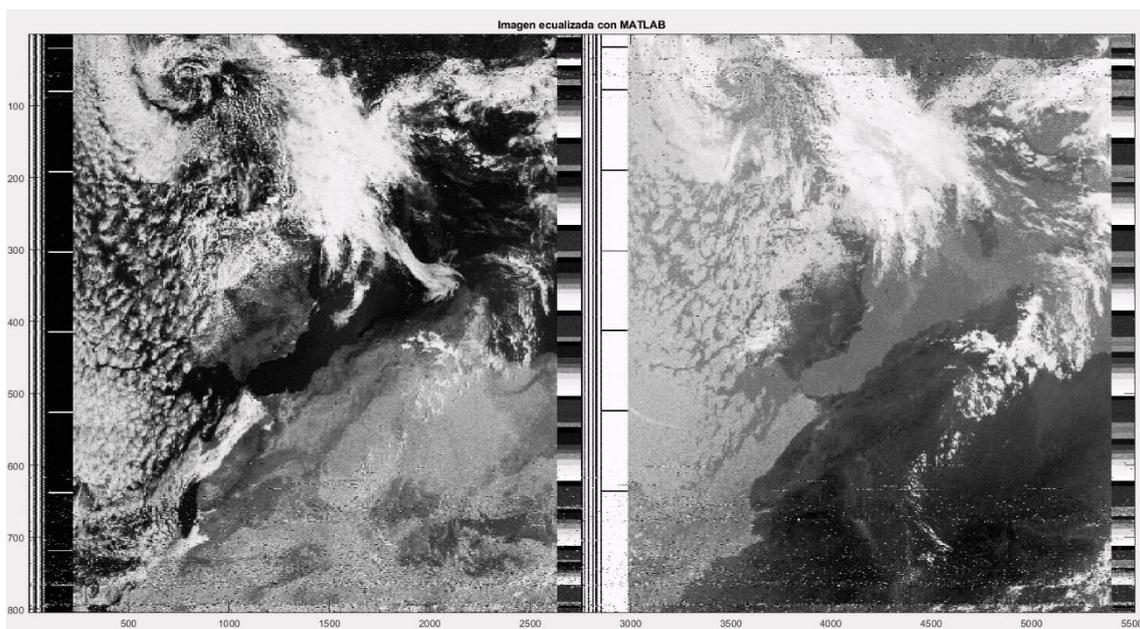
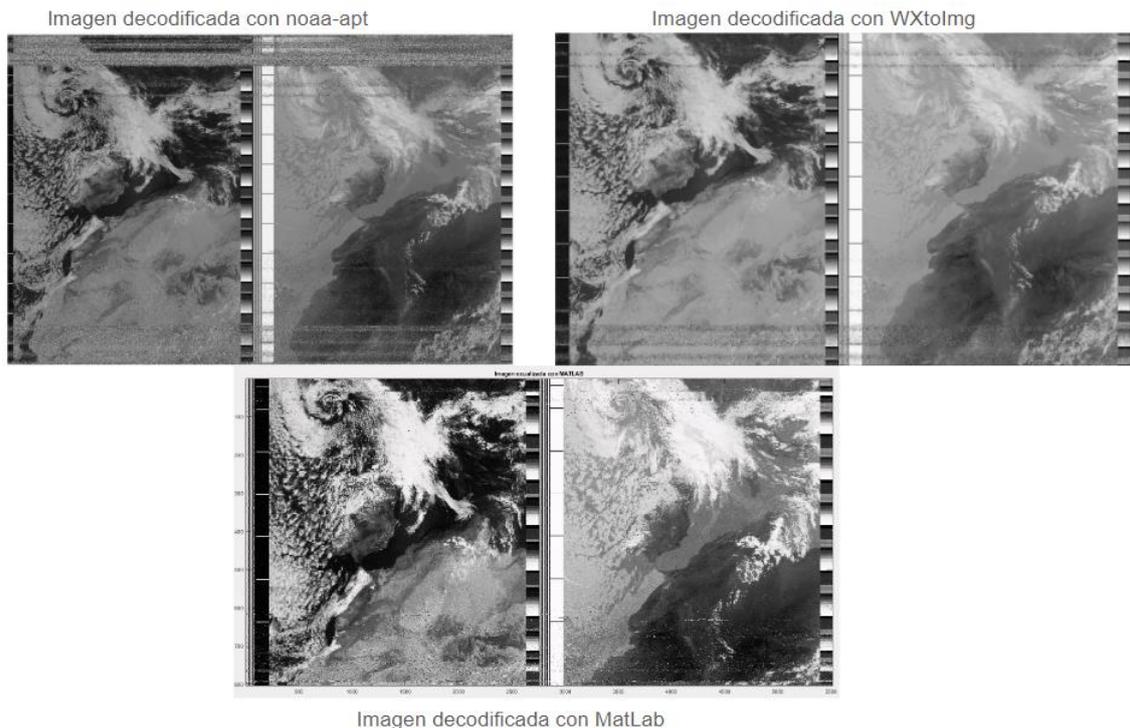


Figura 66. Imagen del quinto pase decodificada con Matlab.

Para finalizar, el programa preguntará si se quiere guardar la imagen en formato PNG, y si es así, indicar el nombre del archivo.

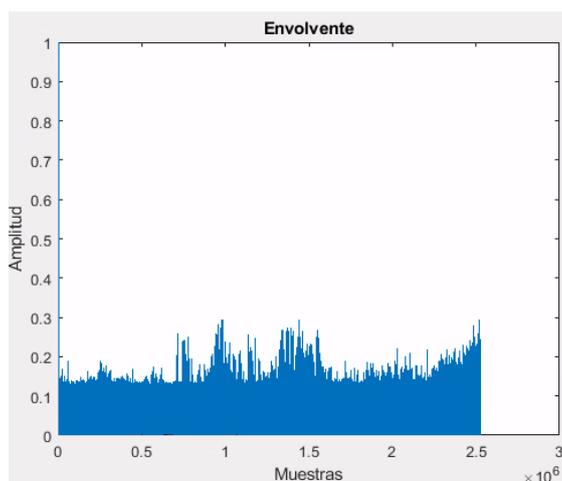
Con la imagen obtenida, podemos comparar con los otros dos softwares que hemos utilizado para hacer pruebas. De tal forma que las tres imágenes son las que se muestran en la Figura 67.



**Figura 67. Comparación Matlab con noaa-apt y WxtoImg. Quinto pase.**

En la comparación de la Figura 67, se puede observar que la imagen decodificada con Matlab tiene incluso una mayor nitidez que las decodificadas con los otros dos softwares. Con solo esta primera prueba realizada, teniendo en cuenta que el pase del satélite fue de casi 90° de elevación, pasamos al último pase registrado durante el día del experimento.

Recordemos que este pase se elevó como máximo a 11°, teniendo esto en cuenta, y con el audio guardado de GNU Radio. Tras la ejecución del programa, obtenemos nuevamente la gráfica con la envolvente de la señal que se observa en la Figura 68.



**Figura 68. Envolvente de la señal del sexto pase.**

Con esta imagen se pueden observar 2 puntos importantes: la duración de la señal es mucho menor (se explica en el Capítulo 7 la razón), y que en el centro de la imagen tendremos ruido y estará

algo pixelada. A continuación, en la Figura 69, se muestra la gráfica de los índices máximos para indicarle el umbral:

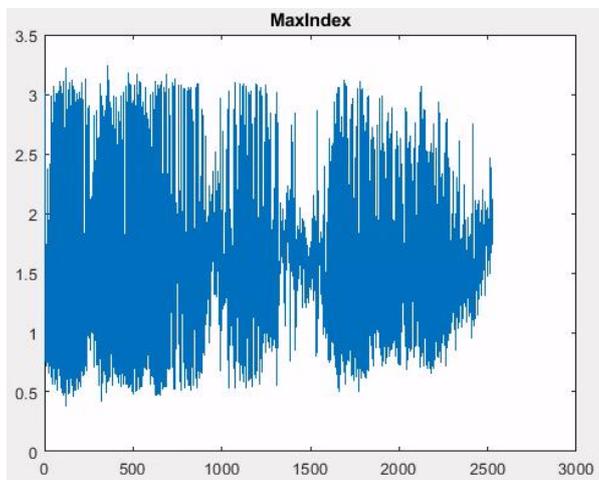


Figura 69. Gráfica de índices máximos sexto pase.

Donde se puede volver a observar una gran diferencia con la gráfica del quinto pase, siendo esta menos estable y coincidiendo los puntos donde no es estable con los puntos de la señal envolvente que marcan la existencia de ruido. A raíz de la gráfica, el umbral será entre 2.4-2.9.

Por último, obtenemos la imagen de la Figura 70.

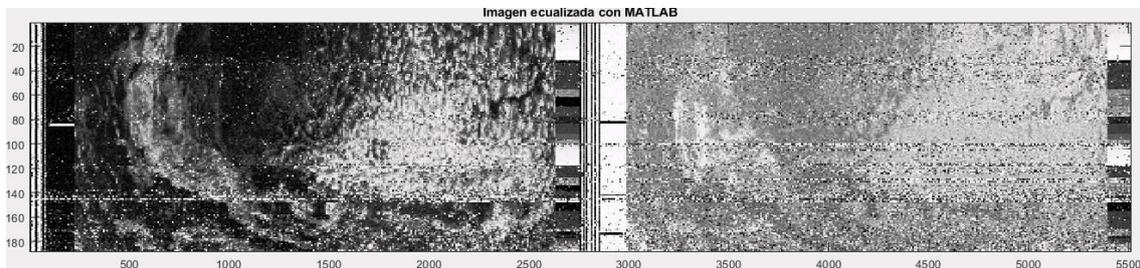
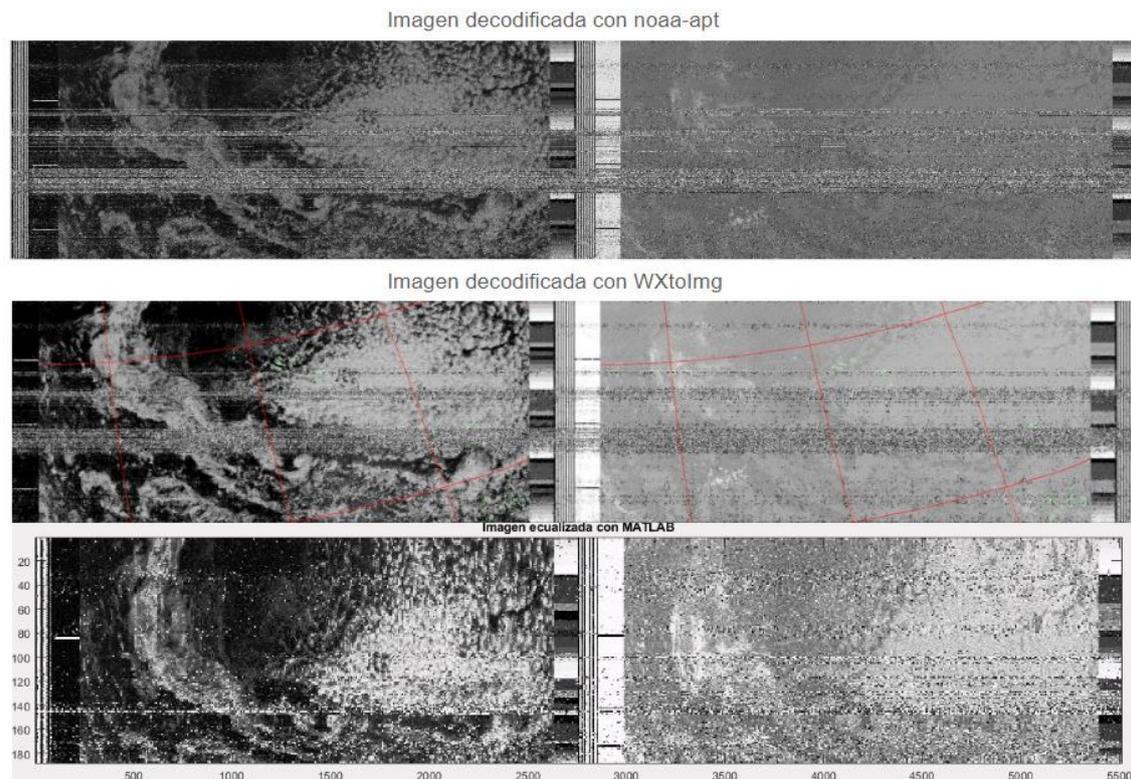


Figura 70. Imagen del sexto pase decodificada con Matlab.

Y si a continuación lo comparamos con las imágenes que decodifican WxtoImg y noaa-apt, todo esto se observa en la Figura 71.



**Figura 71. Comparación Matlab con noaa-apt y WxtoImg. Sexto pase.**

De esta comparación y de la anterior se pueden sacar las siguientes conclusiones:

1. La imagen decodificada con Matlab tiene un mayor contraste de grises comparado con el de los otros programas.
2. Con la imagen decodificada de Matlab se tiene menos cantidad de ruido en la imagen.
3. En pases de mala calidad, aún tiene que mejorar la herramienta de decodificación programada en Matlab.

Con las comparaciones realizadas, tanto en la estación terrena como en Matlab, se demuestra que el diseño del software para la recepción y decodificación de señales de los satélites NOAA funciona de forma correcta, con un margen de mejora.

## 8.2 Esquema final GNU Radio

Como ya se ha dicho en el Capítulo 7, durante el desarrollo del experimento se ha ido desarrollando poco a poco una nueva versión del esquema inicial realizado en GNU Radio. El primer esquema realizado, el cual no recibía correctamente la señal es el que se puede ver en la Figura 72, ya visto anteriormente en la Figura 33:

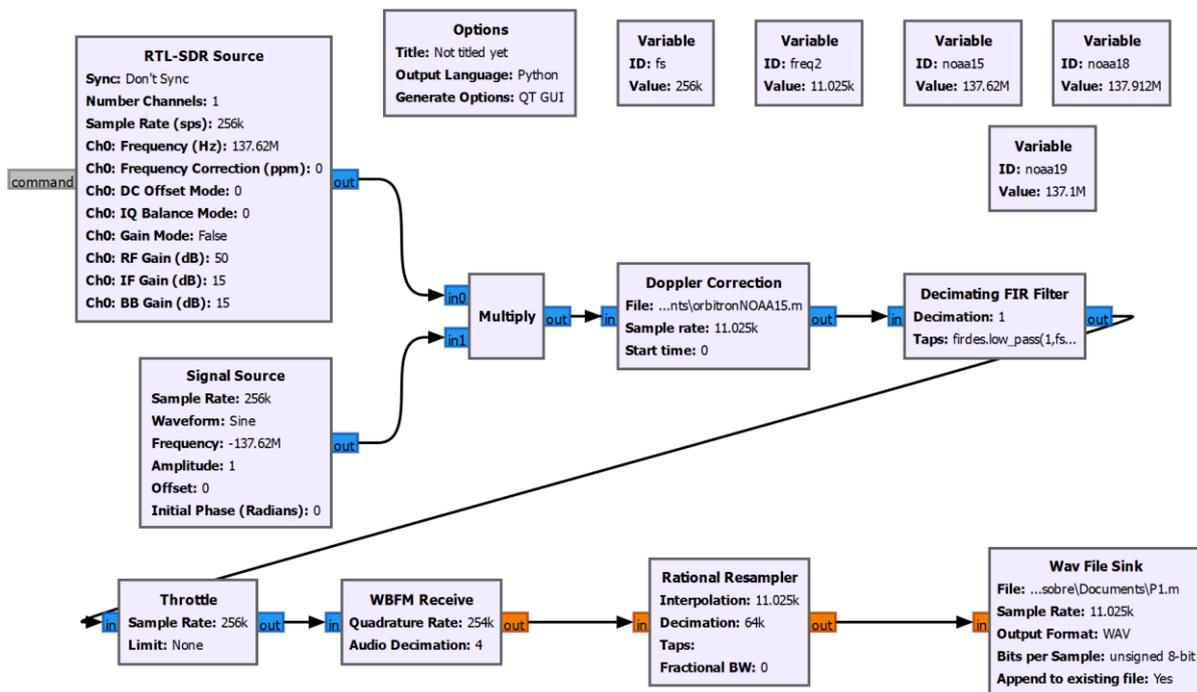


Figura 72. Esquema GNU Radio.

Recordemos que durante el desarrollo del experimento se realizaron los siguientes cambios: se descartaron los bloques Doppler Correction y Throttle, se eliminó el conjunto de los bloques Signal Source y Multiply, se modificó la frecuencia de muestreo inicial junto con la entrada del Rational Resampler (para coincidir con la división de la frecuencia de muestreo entre 4), se añadieron bloques para poder observar las señales en tiempo real y se cambió el bloque Decimating FIR Filter.

Tras todos estos cambios, el esquema final de GNU Radio con el que se han recibido de forma correcta las señales de los satélites NOAA es el que se observa en la Figura 73.

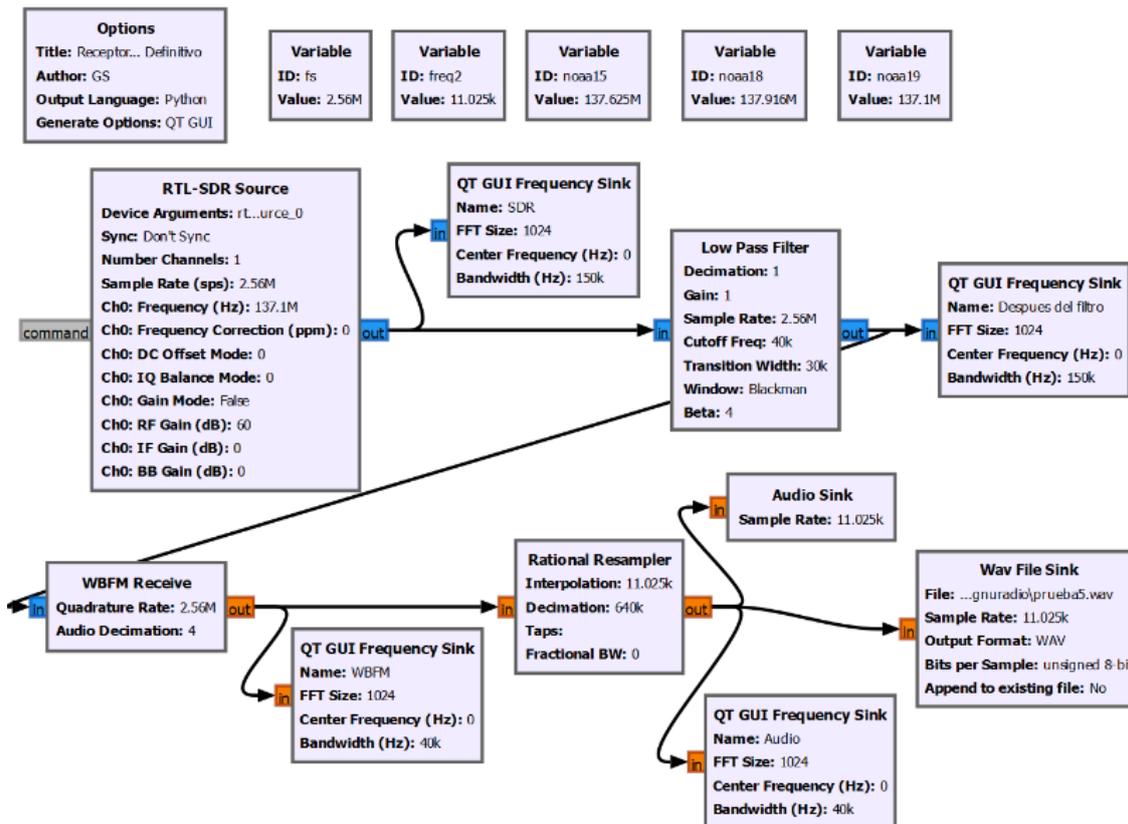


Figura 73. Esquema final GNU Radio.

Donde el cambio más significativo es la sustitución del bloque Decimating FIR Filter por el bloque Low Pass Filter.

Este nuevo bloque tiene las características que se observan en la Figura 74:

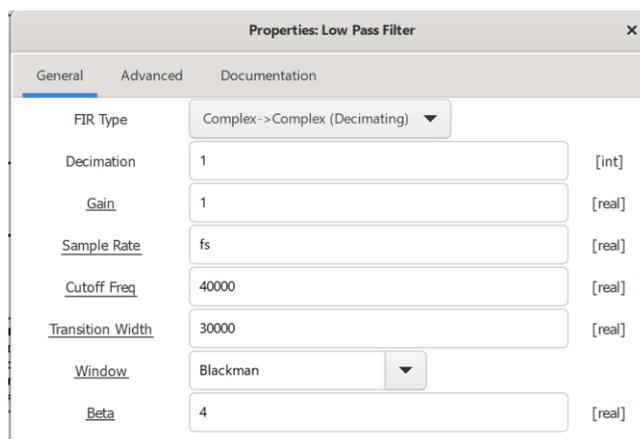


Figura 74. Características filtro paso bajo.

La diferencia principal con el anterior bloque es la posibilidad de poder utilizar diferentes tipos de ventana, ya que en este caso se ha optado finalmente por una ventana de tipo Blackman. Los parámetros de frecuencia de corte y de ancho de banda de transición se han detallado en el Capítulo 7.

En la Figura 75, se muestra un ejemplo de cómo es la visualización de la interfaz gráfica añadida con los bloques QT GUI Frequency Sink, en el ejemplo se observará una comparación entre un pase de buena calidad del satélite y un pase de mala calidad, en concreto los dos últimos pases del día en que se realizó el experimento:

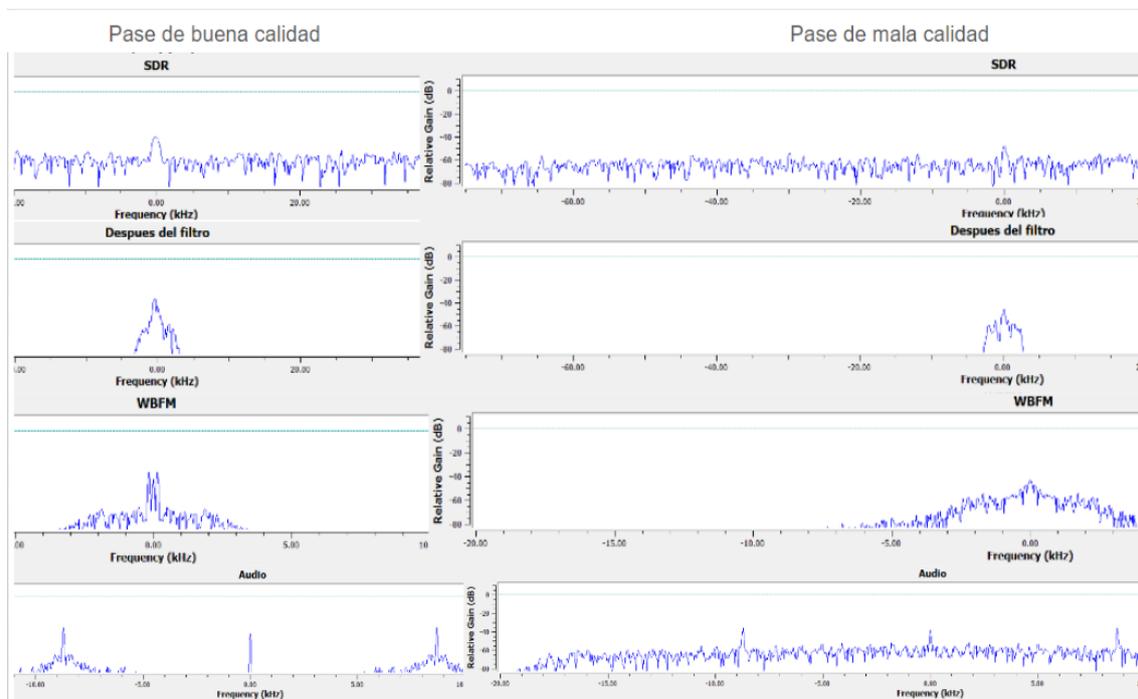


Figura 75. Gráficas GNU Radio.

En la gráfica de la izquierda de “WBFM”, observamos un pico que sobresale del resto de la señal, mientras que en la derecha vemos que ese pico es menos marcado, lo que provoca que la señal no se reciba de forma óptima, aunque como se ha comprobado anteriormente con la señal recibida se puede llegar a decodificar la imagen transmitida.

Observamos el mismo patrón en la gráfica “Audio”, donde en la izquierda se distinguen tres picos que sobresalen, mientras que, en la gráfica de la derecha, los picos se distinguen vagamente debido a las interferencias o ruido que se reciben debido al pase de mala calidad del satélite.

Por lo que, a través del método empírico, donde se ajustó a cada paso una parte del esquema de GNU Radio basándose en la observación de los resultados que se obtenían, se ha alcanzado el objetivo de recibir la señal de un satélite NOAA utilizando un diseño desde cero.

## Capítulo 9. Conclusiones

Durante la introducción y el estado del arte se ha abordado la oportunidad que presenta el trabajo, siendo este la oportunidad de aprender más sobre los satélites y la ocasión de poder interactuar con unos satélites en concreto. Para poder escoger el equipo adecuado para la correcta interacción con los satélites, se han expuesto cuales son las necesidades y restricciones para llevar a cabo el experimento, esto durante el Capítulo 6, la descripción de la estación terrena. Tras describir los objetivos en el primer capítulo, durante el desarrollo del experimento se ha determinado la metodología a utilizar para alcanzar los objetivos, además de que anteriormente, durante el desarrollo del script de Matlab, para probar su correcto funcionamiento también se indica la metodología utilizada.

Tanto para el código en Matlab como para el esquema en GNU Radio, se ha seguido un proceso creativo, en el que finalmente se han generado diferentes soluciones para conseguir un correcto funcionamiento de cada parte del proyecto. Estos procesos describen diferentes aplicaciones de las tecnologías de la ingeniería de telecomunicación.

Al momento de escoger el equipo para la recepción de la señal, había que cumplir ciertas restricciones, que se han comentado anteriormente, pero a pesar de ello existían diferentes opciones que nos permitían realizar el proyecto, y tras la evaluación de estas opciones se propone la mejor opción. Estas diferentes opciones no se refieren tan solo al hardware utilizado, si no también a los días escogidos para realizar el experimento, los cambios realizados en los programas y los diferentes programas utilizados con los que se ha seguido la metodología propuesta.

Como se ha comentado durante la introducción y como se describirá en el Anexo I, el trabajo servirá como actividad divulgativa para alumnos de bachillerato, para que conozcan los conocimientos con los que se puede llegar a terminar la carrera de ingeniería de telecomunicaciones y conseguir que más alumnos ingresen en nuestra escuela. En el Anexo III, se describirán los puntos más importantes a los que afecta este trabajo sobre los ODS, como serán la educación, la acción por el clima o la vida de ecosistemas terrestres.

Tras obtener los resultados presentados en el punto anterior, es el momento de verificar si se han cumplido los objetivos que se propusieron al inicio del proyecto:

El primer objetivo marcado era comprender el funcionamiento de los satélites NOAA, más en concreto de la señal APT que transmiten. Para ello, en primer lugar, se ha realizado una introducción de la historia del hombre en el espacio, indagando a continuación en los satélites y en la teledetección, hasta llegar finalmente a los satélites NOAA y a su historia completa. A través de esta investigación, se ha comprendido el funcionamiento de la señal APT que transmiten de forma continua estos satélites, no tan solo la transmisión si no también el formato de la trama que relaciona la señal con la imagen a decodificar.

Con los conocimientos adquiridos de la transmisión de las señales APT, principalmente: la frecuencia a la que transmite cada uno de los NOAA, el ancho de banda de la señal transmitida, la modulación y la frecuencia de muestreo del audio final, se diseñó el esquema de GNU Radio, que a pesar de que en un principio parecía correcto, se ha ido mejorando, mediante el método empírico, hasta llegar al esquema con el que se ha logrado una correcta recepción de la señal.

Para la decodificación de la imagen en Matlab, también han sido necesarios los conocimientos adquiridos durante la documentación de las señales APT, ya que sin saber cómo es el formato de la trama, las señales de sincronismo, la cantidad de palabras por línea y cuánto tiempo tarda en transmitir una línea, etc., no se podría haber realizado el decodificador en Matlab, ya que se aplican estos conocimientos en el código descrito en el Capítulo 5. Para comprobar en primer momento el funcionamiento del programa, se documentaron hasta 40 audios diferentes de los NOAA, y comparando con el software noaa-apt, se consiguió que las imágenes se visualizasen de forma correcta.

Como se ha podido ver en los resultados del proyecto, los dos programas diseñados, como son el esquema en GNU Radio y el script en Matlab, tienen cierto margen de mejora en comparación con los softwares gratuitos que se han utilizado para realizar las pruebas. Pero a favor de los programas diseñados, es más fácil comprender el camino que sigue la señal tras ser recibida por el SDR hasta llegar a guardarse como audio y el proceso que sigue el script de Matlab para decodificar la imagen, ya que se pueden añadir gráficas a cada paso para poder observar de una manera más interactiva la decodificación. Al contrario que con los softwares ya hechos, que tan solo es indicar la frecuencia y el ancho de banda de la señal a recibir, y posteriormente insertar la imagen en el programa que decodifica la imagen.

El posible trabajo futuro para realizar sobre todo con el esquema de GNU Radio es mejorar la recepción de la señal, que, aunque tras decodificarla es de buena calidad, cuando se está recibiendo y se está escuchando el pitido característico, se percibe ruido de fondo, mientras que con el Airspy SDR se escucha de una forma mucho más nítida utilizando el mismo SDR.

Como proyectos futuros, se podría realizar una comparación con satélites similares a los NOAA, como pueden ser los GOES, los METOP o los Himawari. Todos estos son satélites que al igual que los NOAA transmiten las imágenes en tiempo real.

Sería interesante una comparación del montaje de las antenas necesarias para cada uno de los satélites, ya que por ejemplo los GOES transmiten en banda L y S, los METOP en banda L y Ku y los Himawari en banda Ku, mientras que los NOAA trabajan en VHF. Además de realizar el desarrollo de diferentes softwares para la recepción de las señales y la posterior decodificación de la imagen.

También se podrían estudiar las diferentes características de los satélites, ya que los GOES y los Himawari son satélites geoestacionarios, mientras que los NOAA y los METOP tienen una altura similar sobre los 800 km de altitud.

De esta forma, con documentación e investigación sobre los diferentes satélites, se abordaría casi por completo la teledetección actual a la que se puede acceder mediante estaciones base con cierta complejidad.

Proyectos como este, pueden ser de gran ayuda para la divulgación científica, ya que se les puede acercar a los estudiantes, que estén a las puertas de empezar una ingeniería, cuáles son las posibles finalidades de la carrera y que vean de forma práctica la forma de implementar los conocimientos adquiridos durante los cuatro cursos de la carrera.

Y como se verá en el Anexo III de la memoria, los ODS, las aplicaciones de los programas diseñados en el mundo real pueden tener un gran impacto, ayudando en mayor medida a luchar contra el cambio climático observando la Tierra desde los satélites y detectando posibles amenazas contra la población humana o animal, ayudando también a preservar la vida de ecosistemas terrestres.

Es un proyecto que, con cierto grado de complejidad, es accesible, en términos de equipamiento necesario y de complejidad, para gran parte de la población, aunque bien es cierto que es necesario entender conceptos complejos sobre el tratamiento de señales digitales.

Para finalizar, en el proyecto se han utilizado conocimientos obtenidos durante los 4 cursos de la carrera, empezando por la gestión de proyectos y del tiempo que se aprende en primero de carrera, tratamiento y procesado de señales de asignaturas como TCOM, TDS o TDSC, los conocimientos sobre los satélites y los cálculos que se realizan en la asignatura de Comunicaciones Espaciales, las habilidades obtenidas de las asignaturas de Matemáticas, Ondas electromagnéticas o Señales y Sistemas programando en Matlab y los conocimientos del hardware utilizado como la antena o el preamplificador de asignaturas como Fundamentos de transmisión o Radiocomunicaciones.

## Bibliografía

- [1] National Geographic. (s.f.). *Carrera espacial: paso a paso*. National Geographic en Español. [https://www.nationalgeographic.com.es/llegada-del-hombre-a-la-luna/carrera-espacial-paso-a-paso\\_14369](https://www.nationalgeographic.com.es/llegada-del-hombre-a-la-luna/carrera-espacial-paso-a-paso_14369) (Consultado el 5 de abril del 2024)
- [2] Computer Hoy. (s.f.). *Para toda la humanidad: El increíble legado de la carrera espacial*. Computer Hoy. <https://computerhoy.com/reportajes/tecnologia/toda-humanidad-increible-legado-carrera-espacial-785051> (Consultado el 5 de abril del 2024)
- [3] Zanon Zaldivar, J. A. (2014). *The Future of Space Exploration. Explorations*, 9. [https://www.academia.edu/7830572/The\\_Future\\_of\\_Space\\_Exploration?sm=b](https://www.academia.edu/7830572/The_Future_of_Space_Exploration?sm=b) (Consultado el 6 de abril del 2024)
- [4] Axessnet. (s.f.). *Clima satelital y los satélites meteorológicos*. Axessnet. <https://axessnet.com/clima-satelital-y-los-satelites-meteorologicos/> (Consultado el 8 de abril del 2024)
- [5] CNICE. (s.f.). *Historia de la teledetección*. CNICE. [http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material121/unidad1/histo\\_td.htm](http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material121/unidad1/histo_td.htm) (Consultado el 8 de abril del 2024)
- [6] NOAA. (s.f.). *NOAA 3rd Generation - ITOS*. Recuperado de: [https://space.oscar.wmo.int/satelliteprogrammes/view/noaa\\_3rd\\_generation\\_itos](https://space.oscar.wmo.int/satelliteprogrammes/view/noaa_3rd_generation_itos) (Consultado el 16 de marzo de 2024)
- [7] NOAA. (s.f.). *NOAA 4th Generation*. Recuperado de: [https://space.oscar.wmo.int/satelliteprogrammes/view/noaa\\_4th\\_generation](https://space.oscar.wmo.int/satelliteprogrammes/view/noaa_4th_generation) (Consultado el 16 de marzo de 2024)
- [8] NOAA. (s.f.). *NOAA 4th Generation POES*. Recuperado de: [https://space.oscar.wmo.int/satelliteprogrammes/view/noaa\\_4th\\_generation\\_poes](https://space.oscar.wmo.int/satelliteprogrammes/view/noaa_4th_generation_poes) (Consultado el 18 de marzo de 2024)
- [9] NOAA. (s.f.). *Very High-Resolution Radiometer (VHRR) - NOAA*. Recuperado de: [https://space.oscar.wmo.int/instruments/view/vhrr\\_noaa](https://space.oscar.wmo.int/instruments/view/vhrr_noaa) (Consultado el 17 de marzo de 2024)
- [10] NOAA. (s.f.). *Advanced Very High-Resolution Radiometer (AVHRR)*. Recuperado de: <https://space.oscar.wmo.int/instruments/view/avhrr> (Consultado el 22 de marzo de 2024)
- [11] NOAA. (s.f.). *Advanced Very High-Resolution Radiometer (AVHRR-2)*. Recuperado de: [https://space.oscar.wmo.int/instruments/view/avhrr\\_2](https://space.oscar.wmo.int/instruments/view/avhrr_2) (Consultado el 22 de marzo de 2024)
- [12] NOAA. (s.f.). *Advanced Very High-Resolution Radiometer (AVHRR-3)*. Recuperado de: [https://space.oscar.wmo.int/instruments/view/avhrr\\_3](https://space.oscar.wmo.int/instruments/view/avhrr_3) (Consultado el 22 de marzo de 2024)
- [13] Stack Exchange. (s.f.). *How to improve an FFT AM demodulator for NOAA APT satellite imagery*. Recuperado de: <https://dsp.stackexchange.com/questions/18796/how-to-improve-an-fft-am-demodulator-for-noaa-apt-satellite-imagery> (Consultado el 24 de marzo del 2024)
- [14] Wikipedia. (s.f.). *Automatic Picture Transmission*. En Wikipedia. Recuperado de: [https://en.wikipedia.org/wiki/Automatic\\_picture\\_transmission](https://en.wikipedia.org/wiki/Automatic_picture_transmission) (Consultado el 24 de marzo del 2024)
- [15] Vinicio Quiroga. (s.f.). *NOAA-15*. Recuperado de: <https://viniociquiroya.wixsite.com/vwqgroup/noaa-15> (Consultado el 26 de marzo del 2024)

- [16] wxtoimgrestored.xyz. (s.f). Recuperado de: <https://wxtoimgrestored.xyz/> (Consultado el 28 de marzo del 2024)
- [17] martinber. (s.f). NOAA APT. GitHub. Recuperado de: <https://github.com/martinber/noaa-apt> (Consultado el 28 de marzo del 2024)
- [18] Murillo Fuentes, J. J., & Pérez Domínguez, I. (2011). *Laboratorio de Comunicaciones Digitales Radio Definida por Software* (Capítulos 3 y 4). Universidad de Sevilla y Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones. Recuperado de: <https://personal.us.es/murillo/docente/Libros/LibroSDRV7USv8.pdf> (Consultado el 1 de abril del 2024)
- [19] Tan, L. (2008). *Digital Signal Processing: Fundamentals and Applications*. DeVry University, Decatur, Georgia. Academic Press. [https://www.elec.inaoep.mx/~jmram/Digital\\_Signal\\_Processing\\_LI\\_TAN.pdf](https://www.elec.inaoep.mx/~jmram/Digital_Signal_Processing_LI_TAN.pdf) (Consultado el 1 de abril del 2024)
- [20] B. Stewart, K. Barlee, D. Atkinson, L. Crockett. “Software Defined Radio using Matlab & Simulink and the RTL-SDR,” *University of Strathclyde Engineering* (Consultado el 2 de abril del 2024)
- [21] Base de datos audios NOAA (s.f). Recuperado de: [https://docs.google.com/spreadsheets/d/1GqYHJaWXC9SpqHUL2Hv4tegewwT0\\_CkPbe3wIFt4Ige/edit?pli=1#gid=0](https://docs.google.com/spreadsheets/d/1GqYHJaWXC9SpqHUL2Hv4tegewwT0_CkPbe3wIFt4Ige/edit?pli=1#gid=0) (Consultado el 2 de abril del 2024)
- [22] N2YO. (s.f). N2YO - Satellites: Most Popular. Recuperado de: <https://www.n2yo.com/satellites/?c=most-popular> (Consultado el 7 de mayo del 2024)
- [23] WIMO. (s/f). Antena VHF/UHF. Recuperado de: <https://www.wimo.com/en/you1cf-leo-kit-vhf-uhf-cross-yagis> (Consultado el 30 de mayo del 2024)
- [24] Murillo Fuentes, J. J., & Pérez Domínguez, I. (2011). *Laboratorio de Comunicaciones Digitales Radio Definida por Software* (Capítulo 1). Universidad de Sevilla y Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones. Recuperado de: <https://personal.us.es/murillo/docente/Libros/LibroSDRV7USv8.pdf> (Consultado el 1 de junio del 2024)

## Anexos

### Anexo I: Ejercicio alumnos de bachillerato o ciclos formativos:

En este anexo se detallará la actividad que se realizará a los estudiantes de bachillerato o ciclos formativos que visiten la ETSIT. La actividad se utilizará para divulgar parte de los conocimientos adquiridos durante la carrera, es una buena forma de enseñar como se pueden incluir en un proyecto parte de las materias que se imparten en la carrera y de esta forma animar a los estudiantes a escoger nuestra escuela como centro de estudios universitarios.

La actividad consistirá en una exposición, en la que en primer lugar se explicarán los inicios de la era espacial, siguiendo con el contexto actual de los satélites meteorológicos. A continuación, se describirá el funcionamiento de los satélites NOAA actuales y de sus características, ayudando a entender conceptos como órbita, tipo de observación, polarización, modulación, etc. Para finalizar con la exposición, se realizará una demostración de la recepción de un satélite NOAA (el que pase en ese momento), explicando cual es el proceso que sigue tanto el esquema de GNU Radio para la recepción y conversión de la señal en audio, como el script de Matlab para la decodificación y posterior muestra de la imagen obtenida.

Tras esta presentación y posterior demostración, se realizará un test con la aplicación para ordenadores y smartphones "Kahoot!". Se trata de un servicio web de educación que se comporta como un juego, en el que se recompensa a quienes aciertan de manera consecutiva las respuestas correctas y en un menor tiempo. Existen diferentes tipos de Quiz, ya sea para jugar por equipos o de forma individual. Dentro de cada uno de los Quiz, es posible crear diferentes tipos de preguntas como pueden ser preguntas de test, preguntas de Verdadero y Falso, escribir una respuesta corta o solucionar un puzle, aunque con la versión gratuita de la web solo se dispone de las preguntas de test y las de verdadero o falso. La creación de los Quiz es muy similar a crear una presentación de diapositivas, en la que se deben añadir las preguntas, indicar 4 opciones (en el caso que se pregunta de test) e indicar cual es la respuesta correcta, también existe la opción de insertar una imagen en la pregunta. Con esta aplicación se podrá medir el nivel de atención de los alumnos durante la presentación y puede servir para aclarar conceptos de forma dinámica.

El test creado tiene un total de 9 preguntas, en las 2 primeras se insiste en los inicios de la era espacial, preguntando en que año se lanzó el primer satélite al espacio y en qué año aterrizó el primer hombre en la Luna. En las 2 siguientes, se pregunta sobre los satélites NOAA en el espacio, para ello se pregunta la altura aproximada de los satélites NOAA que siguen en activo y el tipo de órbita de estos. Las siguientes 4 preguntas son más específicas sobre términos y conceptos que se aprenderían en la carrera como son el tipo de sensor de los satélites (activo o pasivo), el tipo de polarización, la frecuencia a la que transmiten los satélites y la modulación de la señal que transmiten. Por último, se preguntará de cuál de los 3 satélites se ha recibido la imagen.



## Anexo II: Código Matlab

### *Código Principal Matlab:*

```
% Paso 1: Leer la señal recibida en .WAV
[y, fs] = audioread(['audio.wav']);

% Paso 2: Filtrar la señal
% Filtro Paso Banda
fc_inferior = 500;
fc_superior = 5000;

FiltroPBanda = designfilt('bandpassfir', ...
    'FilterOrder', 5000, ...
    'CutoffFrequency1', fc_inferior, ...
    'CutoffFrequency2', fc_superior, ...
    'SampleRate', fs);

% Filtramos la Señal
Senyal_filtrada = filter(FiltroPBanda, 1, y);

% Detección de envolvente mediante transformada de Hilbert
envolvente = abs(hilbert(Senyal_filtrada));

% Normalización de la Señal
envolvente = envolvente./max(envolvente);

figure(2);
plot(envolvente);
title('Envolvente');
xlabel('Muestras');
ylabel('Amplitud');

% Paso 3: Señal de Sincronismo
t_sinc = 0:1/fs:1/128;

senal_sinc = (square(1000*t_sinc*(2*pi))); % Generación de la
señal
% de sincronismo

% Paso 4: Encontrar primer pulso de la señal

long_img = 5512;

scan_window = 500; % Ventana de escaneo

umbral = 0; % Valor Umbral

[pos_inic_pulses maxindex] = posicion_inicial(umbral, envolvente,
senal_sinc);

[picos, indice_picos] = findpeaks(maxindex, 'MinPeakDistance', 20);
```



```
% Calcular la media de los picos
media_picos = mean(picos);

umbral = media_picos;

[pos_inic_pulses maxindex] = posicion_inicial(umbral, envolvente,
senyal_sinc);

if pos_inic_pulses(1) < 0
pos_inic_pulses(1) = pos_inic_pulses(2);
end

%% Paso 5: Encontrar principios de línea

% Inicializa la matriz de imagen
img = zeros(length(pos_inic_pulses), long_img);

% Loop para construir la imagen usando la ubicación de los pulsos
de inicio
for i = 1:length(pos_inic_pulses)
    % Calcula la longitud del recorte de la señal
    long_senyal = min(length(envolvente) - pos_inic_pulses(i),
long_img + 1);
    % Recorta la señal justo después del pulso de inicio hasta la
longitud de la imagen
    img(i, 1:long_senyal) =
envolvente(pos_inic_pulses(i):pos_inic_pulses(i) + long_senyal -
1);
end

%% Paso 6: Dibujar la señal

img_ec = histeq(img);

figure(6)
imagesc(img_ec)
drawnow
colormap('gray')
title('Imagen decodificada con MATLAB')
drawnow

% Preguntar al usuario si desea guardar la imagen
opcion = input('¿Desea guardar la imagen resultante? (s/n): ',
's');

if lower(opcion) == 's'
    % Solicitar al usuario el nombre del archivo de salida
    nombre_archivo = input('Ingrese el nombre del archivo de salida
(sin extensión): ', 's');

    % Escalar la imagen al rango [0, 1]
    img_scaled = double(img) / max(img(:));

    % Guardar la imagen resultante en formato PNG
    nombre_archivo_png = [nombre_archivo, '.png'];
```



```
imwrite(img_scaled, nombre_archivo_png);

disp(['La imagen se ha guardado como "', nombre_archivo_png,
"'."]);
else
disp('La imagen no se ha guardado.');
```

```
end

clear
```

### ***Función posición\_inicial:***

```
function [pos_inic_pulses maxindex]= posicion_inicial(umbral,
envolvente, senyal_sinc)

pos_inic_pulses = 0;

j = 1;
pos_inic=1; % Inicializando el primer pulso de la señal
k=1; % Guarda la posición de los pulsos iniciales encontrados

scan_window = 1000; % Ventana de escaneo

long_img = 5500; % Longitud de la imagen

while(pos_inic+scan_window <= length(envolvente))

% Escanea toda la señal

[corr,desplazamiento] =
xcorr(envolvente(pos_inic:pos_inic+scan_window),senyal_sinc);

% Busca el primer pulso
[val_max,pos_val_max] = max(abs(corr));

% Verificando que se ha encontrado la maxima correlación

if val_max > umbral
% Si la correlación está por encima del umbral, lo guarda en la
posicion inicial

offset_opt = desplazamiento(pos_val_max);

% Verificar donde exactamente la señal encontrada está escaneando
la ventana

pos_inic_pulses(k)=pos_inic + offset_opt;

% Se guarda la posición inicial en un array

k=k+1;
end
maxindex(j) = val_max;
```



```
pos_inic = pos_inic + scan_window;  
  
% Se escanea la siguiente parte de la señal  
j = j + 1;  
end  
  
figure(4);  
plot(maxindex)  
title('val_max')  
  
if isempty(pos_inic_pulses)  
  
pos_inic_pulses = 0;  
end  
  
end
```

**Anexo III: RELACIÓN DEL TRABAJO CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE DE LA AGENDA 2030**

Grado de relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

Objetivos de Desarrollo Sostenibles	Alto	Medio	Bajo	No Procede
ODS 1. <b>Fin de la pobreza.</b>				X
ODS 2. <b>Hambre cero.</b>				X
ODS 3. <b>Salud y bienestar.</b>				X
ODS 4. <b>Educación de calidad.</b>		X		
ODS 5. <b>Igualdad de género.</b>				X
ODS 6. <b>Agua limpia y saneamiento.</b>				X
ODS 7. <b>Energía asequible y no contaminante.</b>				X
ODS 8. <b>Trabajo decente y crecimiento económico.</b>				X
ODS 9. <b>Industria, innovación e infraestructuras.</b>		X		
ODS 10. <b>Reducción de las desigualdades.</b>				X
ODS 11. <b>Ciudades y comunidades sostenibles.</b>			X	
ODS 12. <b>Producción y consumo responsables.</b>				X
ODS 13. <b>Acción por el clima.</b>	X			
ODS 14. <b>Vida submarina.</b>			X	
ODS 15. <b>Vida de ecosistemas terrestres.</b>	X			
ODS 16. <b>Paz, justicia e instituciones sólidas.</b>				X
ODS 17. <b>Alianzas para lograr objetivos.</b>		X		

Descripción de la alineación del TFG/TFM con los ODS con un grado de relación más alto.

ODS 13. Acción por el clima: Los satélites NOAA, y más en concreto los programas diseñados, proporcionan información valiosa para la mitigación y adaptación al cambio climático y una posible gestión de desastres naturales.

ODS 15. Vida de ecosistemas terrestres: La información proporcionada, por los programas diseñados, puede ayudar en la monitorización y preservación de los ecosistemas terrestres, especialmente en áreas vulnerables a desastres naturales.

ODS 4. Educación de calidad: Uno de los trabajos futuros de este proyecto es la divulgación científica, centrándose en lo que puede realizar un ingeniero de telecomunicación al realizar su TFG, y e al terminar los 4 cursos de la carrera.

ODS 17. Alianzas para lograr objetivos: Con las imágenes que proporcionan los programas realizados, es más probable llegar a un consenso sobre que hacer en ciertas partes de nuestro ecosistema, creando alianzas tanto entre grupos científicos, países u ONGs.

ODS 9. Industria, innovación e infraestructuras: Para lograr el ODS 17 nombrado anteriormente, será necesario realizar nuevas infraestructuras que ayuden a lograr los objetivos que se planteen, y será necesaria cierta innovación en el aspecto medioambiental para no dañar más nuestro planeta.

#### Anexo IV: Referencias a las imágenes

Figura 2. *Representación artística de una de las sondas Voyager.* (s. f.). <https://upload.wikimedia.org> (Consultado el 6 de abril del 2024)

Figura 3. *TIROS-1 en el "Museo Nacional del Aire y del Espacio.* (s. f.). <https://upload.wikimedia.org> (Consultado el 8 de abril del 2024)

Figura 4. *Evolución histórica de los sistemas de teledetección.* (1990). <https://encrypted-tbn0.gstatic.com> (Consultado el 8 de abril del 2024)

Figura 5. *NOAA 1 [NASA].* (s. f.). [space.skyrocket.de https://space.skyrocket.de](https://space.skyrocket.de) (Consultado el 17 de marzo del 2024)

Figura 6. *Composite image of Northern hemisphere derived from NOAA-2 scanning radiometer visible-spectrum image.* (s. f.). <https://upload.wikimedia.org> (Consultado el 20 de marzo del 2024)

Figura 8. *Advanced Tiros N.* (s. f.). [astronautix.com. http://www.astronautix.com](http://www.astronautix.com) (Consultado el 20 de marzo del 2024)

Figura 9. *Meteorological satellite NOAA K (15) being readied for launch at Vandenberg Air Force Base.* (s. f.). <https://upload.wikimedia.org> (Consultado el 22 de marzo del 2024)

Figura 10. *Cronología satélites NOAA.* (s.f). [climanoaa.home.blog https://www.nesdis.noaa.gov](https://www.nesdis.noaa.gov) (Consultado el 23 de marzo del 2024)

Figura 11. *AVHRR/3.* (s.f). [esa.in https://www.esa.int](https://www.esa.int) (Consultado el 23 de marzo del 2024)

Figura 20. Elementos orbitales. Transparencias asignatura Comunicaciones Espaciales.

Figura 21. *Cinturones de Van Allen.* (s.f). [ecoosfera.com https://spacecenter.org](https://spacecenter.org) (Consultado el 9 de marzo del 2024)

Figura 23. *Comparación órbitas GEO y geosíncronas.* (s.f). [quora.com https://cdn.mos.cms.futurecdn.net](https://cdn.mos.cms.futurecdn.net) (Consultado el 10 de abril del 2024)

Figura 46. Antenas RHCP.

*Antena helicoidal.* (s.f). [manomano.es https://cdn.manomano.com/images/images\\_products/6553473/P/17730845\\_1.jpg](https://cdn.manomano.com/images/images_products/6553473/P/17730845_1.jpg) (Consultado el 5 de mayo del 2024)

*Quadrifilar helix.* (s.f). ru.pinterest.com <https://www.amsat.se/wordpress/wp-content/uploads/2013/10/QFH-antenn.jpg> (Consultado el 5 de mayo del 2024)

*Two-element turnstile antenna for reception of weather satellite data, 137 MHz.* (s.f) <https://dimoni.fortunecity.ws/images/antenas/crossdip.jpg> (Consultado el 5 de mayo del 2024)

Figura 52. *Rotor satélite horizontal/vertical BIG-RAS-HR Alta resolución.* (s.f) wimo.com <https://www.wimo.com> (Consultado el 22 de mayo del 2024)

Figura 55 . *Receptor basado en SDR.* (s.f) Digi-Key Electronics <https://www.digikey.com> (Consultado el 23 de mayo del 2024)